



Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

fakulta strojní

Katedra Energetiky

# **Diplomová práce**

**2011**

**Bc. Michal Čeladník**

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

fakulta strojní

Katedra Energetiky

Zařízení pro separaci CO<sub>2</sub> při využití nízkotlaké turbíny u systému CES

CO<sub>2</sub> Separation Equipment for Low Pressure Turbine in Systém CES

Student:

Bc. Michal Čeladník

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Ladislav Vilimec

Ostrava 2011

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je mým původním autorským dílem, které jsem vypracoval samostatně za použití literatury a podkladů, které jsou v seznamu uvedeny.

Děkuji vedoucímu práce Doc. Ing. Ladislav Vilimec, za odbornou pomoc při tvorbě diplomové práce.

Ostrava

23. 5. 2011

.....

podpis

### **Prohlašuji, že**

- jsem byl seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez výsledku jejich obhajoby.

V Ostravě :.....

.....  
Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Adresa trvalého pobytu autora práce:

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Čeladník, M. Zařízení pro separaci CO<sub>2</sub> při využití nízkotlaké turbíny u systému CES  
Ostrava: Katedra energetiky, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011, 101  
stran. Vedoucí práce: Vilimec, L.

Diplomová práce je zaměřena na bezemisní parní cyklus se spalovacím motorem CES Cleans Energie Systém, který by měl v budoucnu vyrábět elektrickou energii a dopravovat oxid uhličitý do vytěžených ložisek. Výsledky první části práce jsou popis separačního parogenerátoru, rozbor termofyzikálních vlastností paroplynové směsi, návrh bezemisního parního cyklu, výpočet a návrh výměníku tepla pro srážení teploty přehřáté páry při podélném proudění obou medií v navrženém parním cyklu.

V druhé části diplomové práce je cílem navržení výměníku tepla (srážecí přehřátí) jako protiproud pro reálné využití. Při podélném proudění paroplynové směsi v trubkách, která se bude ochlazovat a zahřívat vstupní sytou páru na přehřátou při proudění ve šroubovici. Výsledkem bude výpočtový projekt srážecí přehřátí a výkres trubkovnice. Dalším cílem v druhé části diplomové práce je nakreslení 3D modelu srážecí přehřátí ve skutečných rozměrech podle vypočítaných hodnot.

## ANNOTATION OF THESIS

ČELADNÍK, M. CO<sub>2</sub> Separation Equipment for Low Pressure Turbine in System CES. Ostrava: Department of energy engineering, Faculty of mechanical engineering, VŠB – Technical University of Ostrava, 2009, 101 pages, Thesis, head: Vilimec, L.

The thesis work is focused on zero-emission steam cycle combustion gas engine CES (Cleans Energy System), which should produce electrical power and import carbon dioxide into abandoned mine deposits in future. Results from the first part is a description of separation equipment for carbon dioxide, analysis of the thermophysical properties of steam-gas mixture, the proposal zero-emission steam cycle, calculation and design of heat exchanger to reduce the temperature superheated steam at a longitudinal flow of both of media in the proposed steam cycle.

In the second part of thesis work aims is design of heat exchanger (collider overheating) as a counterflow for realistic use. The longitudinal flow steam-gas mixture in pipes, which will cooled dawn and calorify input saturation steam to superheated steam at flow in spiral. As a result will be computational project collider overheating and drawing tube. Another aim in the second part of the thesis is draw 3D model of collider overheating in the real dimensions according to values of calculation.

## Obsah

1	Úvod .....	11
1.1	Separální parogenerátor .....	12
1.2	Princip separčního parogenerátoru.....	14
2	Výpočet termodynamických vlastností a transportních vlastností paroplynové směsi. ....	16
2.1	Paroplynová směs .....	16
2.1.1	Stanovení parciálních tlaků .....	17
2.1.2	Hustota směsi.....	18
2.1.3	Entalpie směsi.....	18
2.1.4	Tepelná vodivost směsi .....	19
2.1.5	Dynamická viskozita směsi .....	21
2.1.6	Kinematická viskozita paroplynové směsi .....	22
3	Navržení bezemisního parního cyklu CES .....	23
3.1	Navržení bezemisního paroplynového cyklu peach point metodou .....	23
3.1.1	Výpočet paroplynového cyklu.....	27
4	Návrh srážecí přehrátky paroplynové směsi .....	38
4.1	Výpočet termodynamických vlastností ve srážecí přehrátky .....	39
4.1.1	Parciální tlak vodní páry a oxidu uhličitého .....	41
4.1.2	Hustota paroplynové směsi a syté páry .....	41
4.1.3	Entalpie paroplynové směsi a syté páry ve srážecí přehrátky .....	44
4.1.4	Tepelná vodivost paroplynové směsi a syté páry .....	46
4.1.5	Výpočet dynamické viskozity paroplynové směsi a syté páry .....	50
4.1.6	Kinematická viskozita paroplynové směsi a syté páry ve srážecí přehrátky .....	53
4.2	Výpočet sdílení tepla pro návrh srážecí přehrátky .....	55
4.2.1	Výpočet množství trubek v trubkovnici .....	55
4.3	Přeprava srážecí přehrátky .....	68
5	Návrh srážecí přehrátky při příčném šroubovitým obtékání.....	69
5.1	Možné konstrukce srážecí přehrátky .....	69
5.3	Výpočet srážecí přehrátky při podélném a příčném obtékání ve šroubovici .....	73
5.3.1	Výpočet množství trubek v trubkovnici.....	73
5.3.2	Výpočet první části srážecí přehrátky.....	75
5.3.3	Výpočet druhé části srážecí přehrátky .....	85
5.4	Pevnostní dimenzování srážecí přehrátky .....	92
5.5	Výsledný návrh srážecí přehrátky .....	94
6	Závěr .....	98
7	Seznam Použité literatury .....	100
8	Přílohy .....	101



## Seznam použitých symbolů, označení a zkratek

Značka	Veličina	Jednotka
Nu	Nusseltovo číslo	[-]
q	Newtonův zákon pro přestup tepla	[W.m <sup>-2</sup> ]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
Pr	Prandtlovo číslo	[-]
h	entalpie	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
h <sub>sm</sub>	entalpie směsi	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
h <sub>co2</sub>	entalpie oxidu uhličitého	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
h <sub>vp</sub>	entalpie vodní páry	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
P	tlak	[bar]
P <sub>co2</sub>	parciální tlak oxidu uhličitého	[bar]
P <sub>vp</sub>	parciální tlak vodní páry	[bar]
P <sub>c</sub>	celkový tlak směsi	[bar]
T <sub>sat</sub>	saturační teplota	[°C]
m <sub>sm</sub>	hmotnostní průtok paroplynové směsi	[kg.s <sup>-1</sup> ]
W <sub>co2</sub>	koncentrace oxidu uhličitého ve směsi	[-]
W <sub>vp</sub>	koncentrace vodní páry ve směsi	[-]
ρ <sub>sm</sub>	hustota paroplynové směsi	[kg/m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>co2</sub>	hustota oxidu uhličitého	[kg/m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>vp</sub>	hustota vodní páry	[kg/m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>sp</sub>	hustota syté páry	[kg/m <sup>3</sup> ]
S <sub>vs-vstup</sub>	Průřez vstupního potrubí	[m]
w <sub>sm</sub>	vstupní rychlost paroplynové směsi	[m/s]
M <sub>vp</sub>	Molární hmotnost vodní páry	[kg/kmol]
M <sub>co2</sub>	Molární hmotnost oxidu uhličitého	[kg/kmol]
n <sub>co2</sub>	látkové množství oxidu uhličitého	[mol]
n <sub>vp</sub>	látkové množství vodní páry	[mol]
y <sub>co2</sub>	molární podíl oxidu uhličitého	[-]
y <sub>vp</sub>	molární podíl vodní páry	[-]
λ <sub>co2</sub>	tepelná vodivost oxidu uhličitého	[w/m.K]

$\lambda_{vp}$	tepelná vodivost vodní páry	[w/m.K]
$\lambda_{sm}$	tepelná vodivost paroplynové směsi	[w/m.K]
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	[w/m <sup>2</sup> .K]
$\eta$	dynamická viskozita	[kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$\nu$	kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]

## Vystětlivky

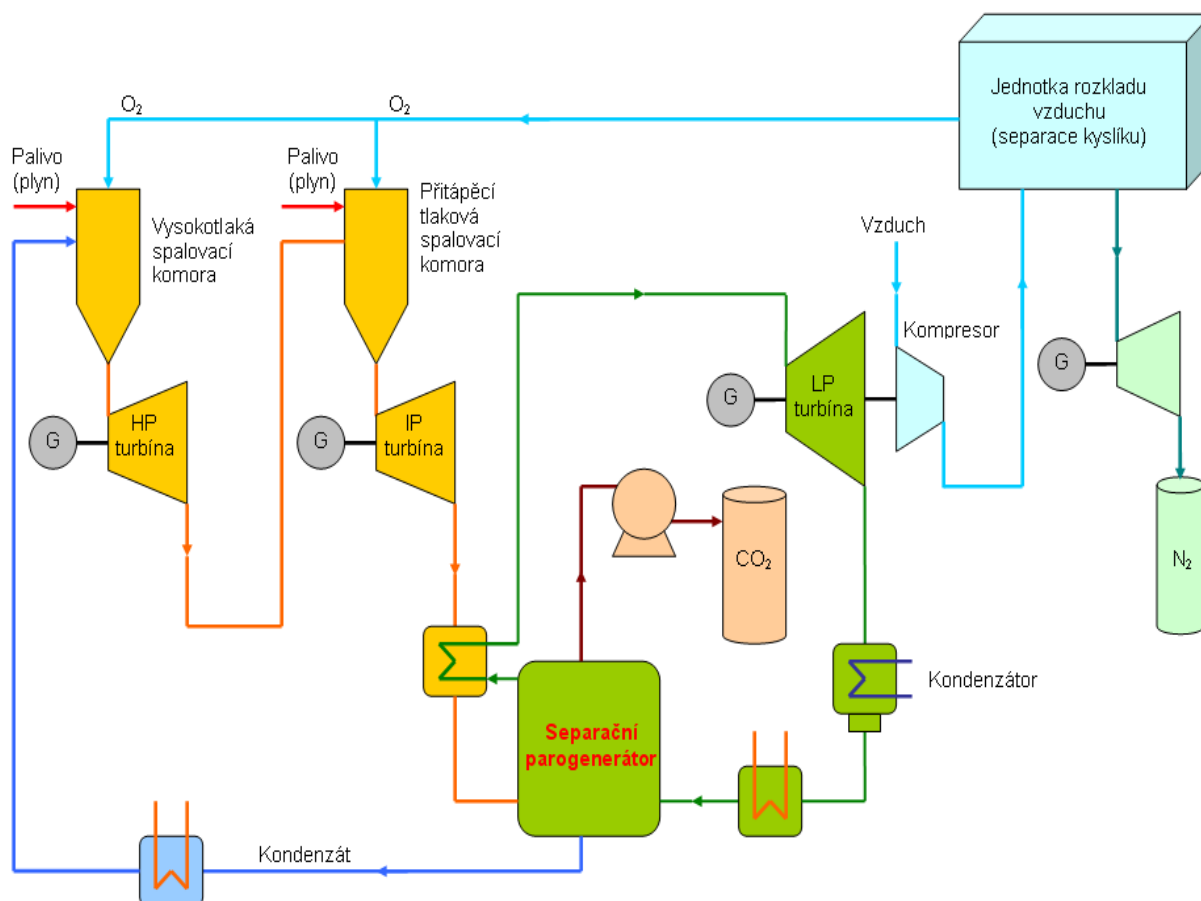
CarbonDioxide	Oxid uhličitý
SteamIAPWS	Vodní pára na stavu sytosti
Steam	Vodní pára
Conductivity	Tepelná vodivost
MolarMass	Molární hmotnost
Viscosity	Viskozita
CES	Cleans Energie System

## Zkratka

## Název

T_sat	Saturační teplota
CES	cleans energii systém
SPG	separační parogenerátor
pp	Paroplynová směs
sp	sytá páry
sm	směs = paroplynová směs
vp	vodní pára





Obr. 1.2 Možné zapojení SPG v bezemisním paroplynovém cyklu

## 1.1 Separační parogenerátor

Vývoj a výzkum toho zařízení je podporován finančně MPO ČR. Simulační zařízení separačního parogenerátoru bylo postaveno ve Výzkumném energetickém centru Vysoké školy báňské ve spolupráci s Vítkovice Power energy. Simulační zařízení nazýváme proto, že v něm testujeme chování paroplynové směsi v průběhu její kondenzace a tím odseparování oxidu uhličitého a vodní páry, zařízení je rozděleno na 6 sekcí a v každé sekci se měří termofyzikální vlastnosti paroplynové směsi. Naměřené hodnoty pak používáme k porovnání se vztahy pro kondenzaci paroplynové směsi v potřebné literatuře a můžeme vybrat potřebné vztahy k výpočtu rozhodujících kritérií pro konstrukci separačního parogenerátoru. Simulační zařízení SPG vidíme na (obr. 1.3, 1.4 a 1.5).



*Obr. 1.3 Simulační zařízení separačního parogenerátoru*



*Obr. 1.4 Kondenzace paroplynové směsi v separačním parogenerátoru*

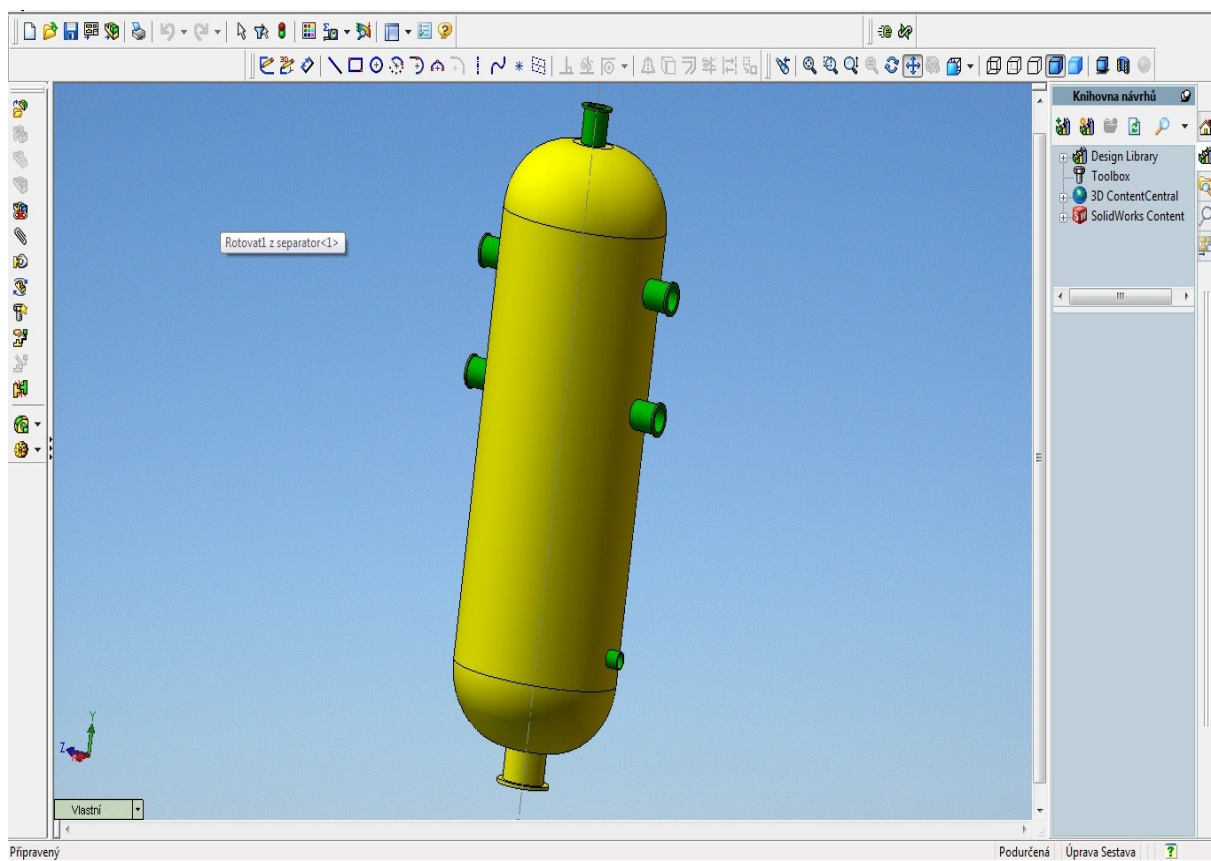




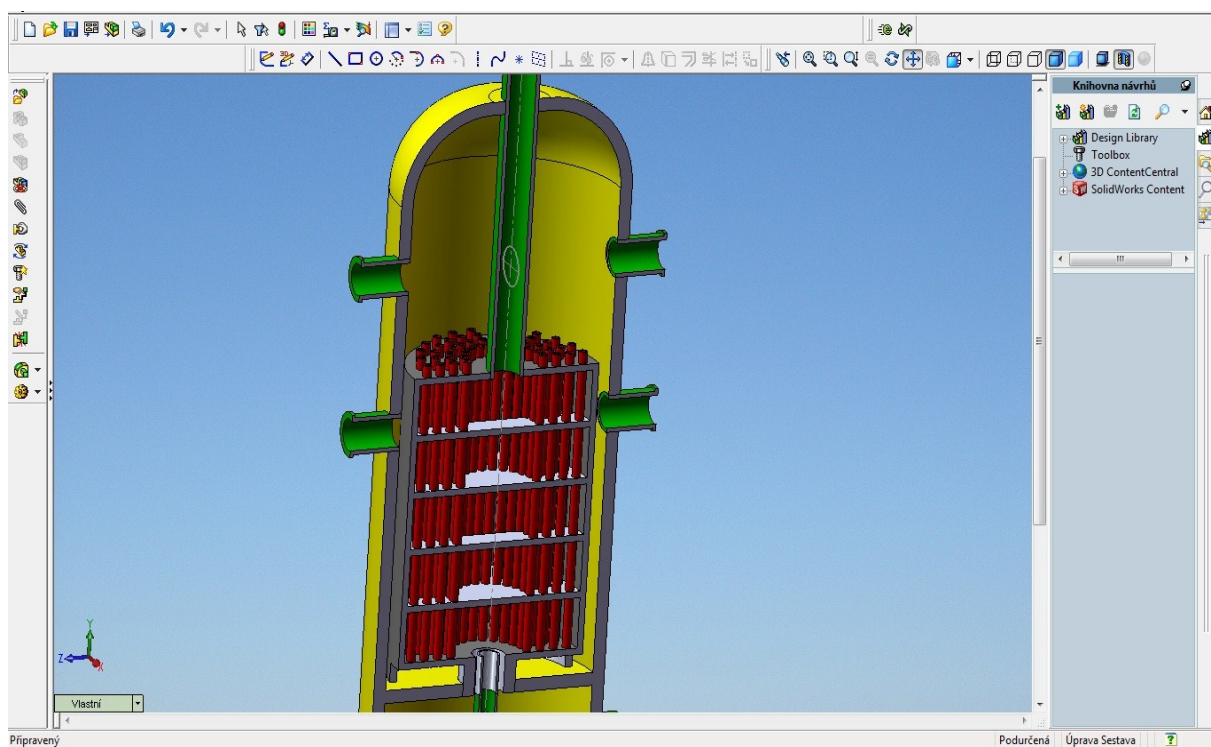
*Obr. 1.5 Simulační zařízení SPG*

## **1.2 Princip separačního parogenerátoru [1]**

Separačním parogenerátorem se snažíme odseparovat směs vodní páry a oxidu uhličitého. Vstupujícím médiem je směs vodní páry a  $\text{CO}_2$  při saturační teplotě. Směs proudí vstupním potrubím a přivádí se nad trubkovnici výparníku do mezitrubkového prostoru, kde proudí ve spirále kolem svislých trubek výparníku. Paroplynová směs v mezitrubkovém prostoru postupně kondenzuje a předává své kondenzační teplo napájecí vodě proudící ve vertikálních trubkách a ohřívá ji na stav syté kapaliny a jakmile dosáhne napájecí voda stavu syté kapaliny, začne se odpařovat. Při kondenzaci paroplynové směsi dochází ke změně koncentrace vodní páry a  $\text{CO}_2$ , koncentrace vodní páry se v dalších částech zmenšuje v průběhu její kondenzace. Snažíme se odseparovat co největší množství vodní páry ve směsi, ale separace je závislá na mnoha faktorech (velikosti komory ve které dochází ke kondenzaci, atd...). Namodelovaný separační parogenerátor můžeme vidět na (obr. 1.6, 1.7 a 1.8).

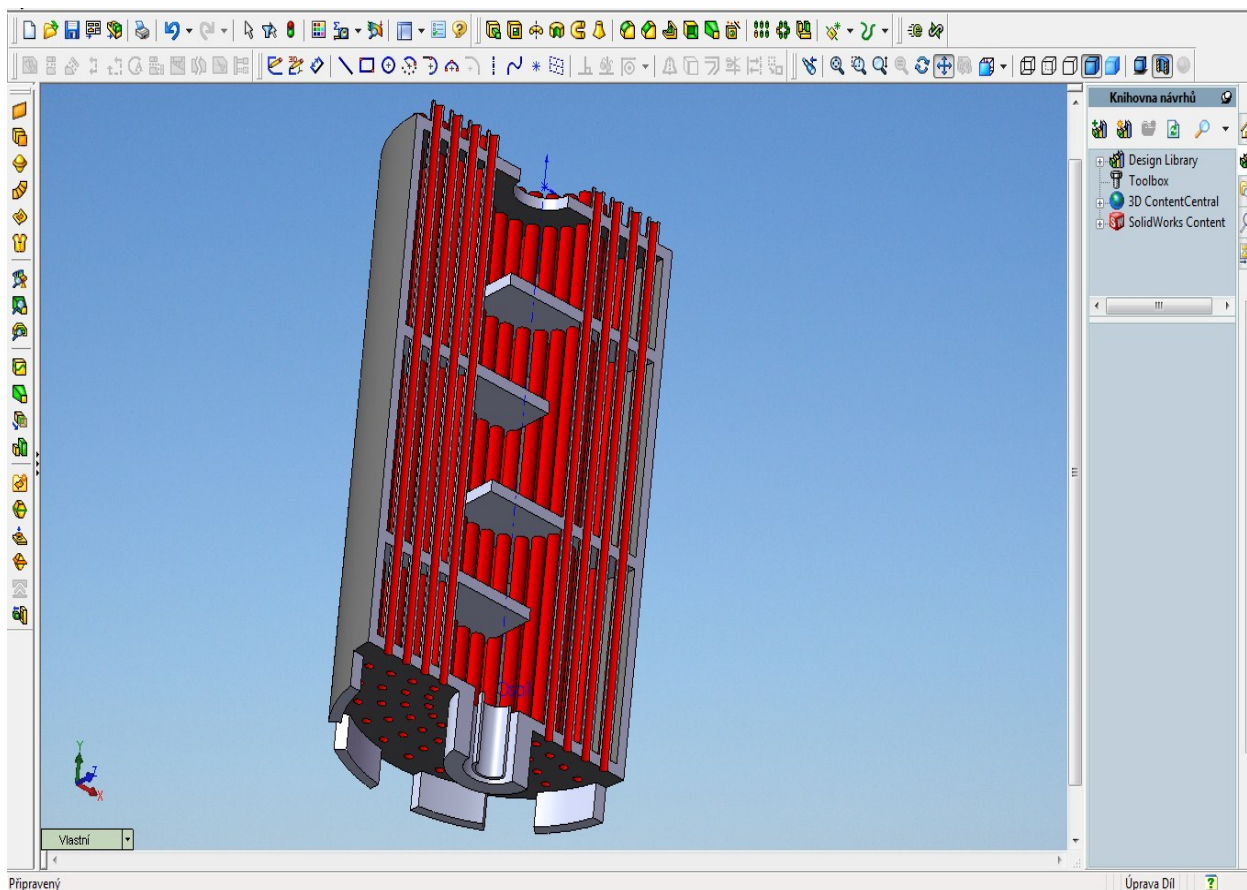


*Obr. 1.6 Namodelovaný separační parogenerátor v programu Solidworks*



*Obr. 1.7 Namodelovaný SPG v programu solidworks v řezu*





*Obr. 1.8 Výměník tepla v SGP*

## **2 Výpočet termodynamických vlastností a transportních vlastností paroplynové směsi.**

Pro navržení vlastního paroplynového cyklu a výpočet výměníku tepla, který sráží teplotu paroplynové směsi a zároveň ohřívá sytou páru na přehřátou vystupující ze separačního parogenerátoru, potřebujeme znát termodynamické vlastnosti jak pro samotný návrh zařízení, tak pro energetickou bilanci paroplynového cyklu.

### **2.1 Paroplynová směs [4]**

Paroplynová směs je v našem případě tvořena stlačenou přehřátou parou a oxidem uhličitým v poměru 85% přehřáté páry a 15% oxidu uhličitého. Koncentrace a vlastnosti paroplynové směsi se v jednotlivých zařízeních paroplynového cyklu mění (spalovací generátor, vysokotlaká turbína, srážecí přehřátí, separační parogenerátor). V mé diplomové práci řeším srážecí přehřátí na základě bilance separačního parogenerátoru, řešení dalších zařízení v paroplynovém cyklu je pro další diplomové práce. Pro výpočet směsi dvou plynů musíme zohlednit několik důležitých zákonů, které vysvětlím při konkrétních výpočtech.



Popíšeme si postupný výpočet termodynamických vlastností směsi obecně, abychom pochopili princip výpočtu. Při výpočtu srážecí přehřátí paroplynové směsi a navržení paroplynového cyklu nevystačíme s ručním výpočtem, protože se jedná o velké množství vzorců a ruční výpočet by nám zabral spoustu času, takže využijeme například Microsoft Excel nebo EES profesionál. Pro řešení srážecí přehřátí a nebilancování paroplynového cyklu jsem si vybral program EES profesionál, který nám dokáže přesně vyhledat určité vlastnosti páry a oxidu uhličitého a také je přehlednější ve znázornění složitých vzorců a umožňuje opravu chyby.

### 2.1.1 Stanovení parciálních tlaků

Pro termodynamické a transportní vlastnosti paroplynové směsi je nutné znát parciální tlaky složek směsi. Parciální tlak vodní páry  $p_{vp}$  nám rovněž určuje rosný bod směsi. Musíme znát také hmotnostní koncentrace dvou složek v paroplynové směsi vodní páru a oxidu uhličitého.

$$p_{vp} = p_c \cdot \left[ 1 - \frac{W_{co_2} \cdot r_{co_2}}{W_{co_2} \cdot r_{co_2} + W_{vp} \cdot r_{vp}} \right] \text{ [bar]} \quad (2.1.1.1)$$

$P_c$	[bar]	- Celkový tlak paroplynové směsi
$W_{co_2}$	[-]	- Hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého
$W_{vp}$	[-]	- Hmotnostní koncentrace vodní páry
$r_{co_2}$	[kJ/kg.K]	- Měrná plynová konstanta oxidu uhličitého
$r_{vp}$	[kJ/kg.K]	- Měrná plynová konstanta vodní páry

Při výpočtu parciálního tlaku oxidu uhličitého musíme respektovat Daltonův zákon, který nám říká, že tlak směsi se rovná součtu parciálních tlaků plynů, tak spočítáme parciální tlak  $p_{co_2}$  ve směsi.

$$p_{co_2} = p_c - p_{vp} \quad \text{[bar]} \quad (2.1.1.2)$$

### 2.1.2 Hustota směsi

Hustota je důležitou veličinou při výpočtu rychlosti paroplynové směsi a jde vypočítat jako aditivní součet vodní páry a oxidu uhličitého nebo v programu EES si vyhledáme hustotu vodní páry a oxidu uhličitého při požadovaném parciálním tlaku a teplotě.

$$\rho_{sm} = \frac{p_{co2}}{r_{co2} \cdot T_{sm}} + \frac{p_{vp}}{r_{vp} \cdot T_{sm}} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (2.1.2.1)$$

$p_{co2}$  [bar] - Parciální tlak oxidu uhličitého

$p_{vp}$  [bar] - Parciální tlak vodní páry

$T_{sm}$  [K] - Termodynamická teplota paroplynové směsi

V některých případech potřebujeme hustotu přepočítat na normální podmínky ( $t_N = 0^\circ\text{C}$ ,  $P_N = 101\,325\text{ Pa}$ ) a přepočítá se podle vztahu:

$$\rho_{sm,N} = \rho_{sm} \cdot \frac{p_N}{p_{sm}} \cdot \frac{T_{sm}}{T_N} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (2.1.2.2)$$

### 2.1.3 Entalpie směsi

K určení entalpie směsi potřebuji znát entalpii oxidu uhličitého a entalpii vodní páry. Můžeme použít termodynamické tabulky pro vodní páru a oxidu uhličitého nebo T-s diagramy a snažit se co nejpřesněji vyhledat danou entalpii při parciálním tlaku a teplotě nebo interpolovat výsledky v tabulkách. Snazší a přesnější je určení entalpií vodní páry a oxidu uhličitého v programu EES.

Funkce pro zadání entalpie vodní páry v programu EES:

$$h_{vp} = \text{Enthalpy}(\text{Steam\_IAPWS}; T = t_{vp}; P = P_{vp})$$

$t_{vp}$  [°C] - Teplota vodní páry

$p_{vp}$  [bar] - Parciální tlak vodní páry

Steam\_IAPWS - Vodní pára

Funkce pro zadání entalpie oxidu uhličitého v programu EES:

$h_{co2} = \text{Enthalpy}(\text{CarbonDioxide}; T = t_{co2}; P = p_{co2})$

$t_{co2}$  [°C] - Teplota oxidu uhličitého

$p_{co2}$  [bar] - Parciální tlak oxidu uhličitého

CarbonDioxide - Oxid uhličitý

Entalpii směsi pak může vypočítat jako součet entalpie oxidu uhličitého krát jeho koncentrace ve směsi a entalpie vodní páry krát koncentrace ve směsi.

$$h_{sm} = W_{CO_2} \cdot h_{CO_2} + W_{vp} \cdot h_{vp} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2.1.3)$$

$W_{co2}$  [-] - Hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého

$W_{vp}$  [-] - Hmotnostní koncentrace vodní páry

#### 2.1.4 Tepelná vodivost směsi

Citace [1] „Součinitel tepelné vodivosti je fyzikálním parametrem látky. Součinitel tepelné vodivosti je teplo, které projde za jednotku času jednotkovou plochou izotermického povrchu, přičemž v tělese je jednotkový teplotní gradient. Obecně závisí na teplotě, tlaku a složení látky a určuje se většinou měřením hustoty tepelného toku, gradientu teploty a potom výpočtem z rovnice“.

Pro výpočet tepelné vodivosti potřebujeme znát fyzikální vlastnosti jako molární hmotnost, látkové množství, molární podíl dané látky ve směsi a látkové množství oxidu uhličitého a vodní páry. K tomuto řešení využiji program EES, který nám s velkou přesností stanoví potřebné hodnoty při zadaných parametrech.

Molární hmotnost paroplynové směsi určená v programu EES:

$M_{vp} = \text{MolarMass}(\text{Steam\_IAPWS})$

$M_{vp} = 18,02$  [kg/kmol] - Molární hmotnost vodní páry

$M_{co2} = \text{MolarMass}(\text{CarbonDioxide})$

$M_{\text{CO}_2} = 44,01$  [kg/kmol] - Molární hmotnost oxidu uhličitého

Výpočet látkové množství oxidu uhličitého a vodní páry v paroplynové směsi zadané hmotnostní koncentrací

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{W_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}} \cdot 100 \quad [\text{mol}] \quad (2.1.4.1)$$

$n_{\text{CO}_2}$  [mol] - Látkové množství oxidu uhličitého

$$n_{\text{vp}} = \frac{W_{\text{vp}}}{M_{\text{vp}}} \cdot 100 \quad [\text{mol}] \quad (2.1.4.2)$$

$n_{\text{vp}}$  [mol] - Látkové množství vodní páry

Molární podíl dané látky:

$$Y_{\text{CO}_2} = \frac{n_{\text{CO}_2}}{n_{\text{C}}} \quad (2.1.4.3)$$

$Y_{\text{CO}_2}$  [-] - molární podíl oxidu uhličitého

$$Y_{\text{vp}} = \frac{n_{\text{vp}}}{n_{\text{C}}} \quad (2.1.4.4)$$

$Y_{\text{vp}}$  [-] - Molární podíl vodní páry

Tepelnou vodivost vodní páry a oxidu uhličitého můžeme vyhledat v tabulkách, v diagramech, ale použijí k určení program EES.

$$L_{\text{vp}} = \text{Conductivity}(\text{Steam\_IAPWS}; T = t_{\text{vp}}; P = P_{\text{vp}})$$

$L_{\text{vp}}$  [w/m.K] - Tepelná vodivost vodní páry

Conductivity - Tepelná vodivost

$$L_{\text{CO}_2} = \text{Conductivity}(\text{CarbonDioxide}; T = t_{\text{CO}_2}; P = p_{\text{CO}_2})$$

$L_{\text{CO}_2}$  [w/m.K] - Tepelná vodivost oxidu uhličitého

Conductivity - Tepelná vodivost

Tepelnou vodivost směsi pak můžeme spočítat dle vztahu:

$$\lambda_{sm} = \frac{y_{CO_2} \cdot \lambda_{CO_2} \cdot M_{CO_2}^{1/3} + y_{vp} \cdot \lambda_{vp} \cdot M_{vp}^{1/3}}{y_{CO_2} \cdot M_{CO_2}^{1/3} + y_{vp} \cdot M_{vp}^{1/3}} \quad [W/m.K] \quad (2.1.4.4)$$

### 2.1.5 Dynamická viskozita směsi

Viskozita se rozlišuje dynamická  $\eta$  v jednotkách [Pa.s] což odpovídá základním jednotkám [kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>] a kinematická  $\nu$  v jednotkách [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>]. Mezi oběma platí vztah:

$$\eta = \nu \cdot \rho \quad [kg.m^{-1}.s^{-1}] \quad (2.1.5.1)$$

S nárůstem tlaku a snižováním teploty dynamická viskozita roste, pro výpočet dynamické viskozity musíme spočítat bezrozměrné korelace podle vztahu (2.1.5.3) a pro výpočet dynamické viskozity paroplynové směsi použijeme vztah (2.1.5.4).

Pro výpočet dynamické viskozity směsi potřebujeme znát dynamickou viskozitu oxidu uhličitého a vodní páry, která je závislá na tlaku a teplotě obou medií. Můžeme ji nalézt v termodynamických tabulkách nebo si ji vyhledáme v programu EES profesionál následovně:

$$\eta_{vp} = \text{Viscosity}(\text{Steam\_IAPWS}; T = t_{vp}; P = P_{vp})$$

Viscosity - Dynamická viskozita

$\eta_{vp}$  [kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>] - Dynamická viskozita vodní páry

$$\eta_{co2} = \text{Viscosity}(\text{CarbonDioxide}; T = t_{co2}; P = p_{co2})$$

$\eta_{co2}$  [kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>] - Dynamická viskozita oxidu uhličitého

Výpočet korelací vodní páry a oxidu uhličitého potřebných pro dynamickou viskozitu směsi

$$\Phi_{\text{co}_2} = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{\eta_{\text{vp}}}{\eta_{\text{co}_2}} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{M_{\text{co}_2}}{M_{\text{vp}}} \right)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left( 1 + \frac{M_{\text{vp}}}{M_{\text{co}_2}} \right)^{1/2}} \quad [-] \quad (2.1.5.2)$$

$\Phi_{\text{co}_2}$  - Korelace oxid uhličitý

$M_{\text{co}_2} = 44,01$  [kg/kmol] - Molární hmotnost oxidu uhličitého

$$\Phi_{\text{vp}} = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{\eta_{\text{co}_2}}{\eta_{\text{vp}}} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{M_{\text{vp}}}{M_{\text{co}_2}} \right)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left( 1 + \frac{M_{\text{co}_2}}{M_{\text{vp}}} \right)^{1/2}} \quad [-] \quad (2.1.5.3)$$

$\Phi_{\text{vp}}$  - Korelace pro vodní páru

$M_{\text{vp}} = 18,02$  [kg/kmol] - Molární hmotnost vodní páry

Dosadíme do vzorce pro dynamickou viskozitu směsi (2.1.5.1). Existují i jiné vzorce, ale výsledkem by měla být podobná hodnota viskozity a proto je lepší si ověřit správnost výsledku i jiným vzorcem.

$$\eta_{\text{sm}} = \frac{\eta_{\text{vp}}}{1 + \Phi_{\text{co}_2} \cdot \frac{y_{\text{co}_2}}{y_{\text{vp}}}} + \frac{\eta_{\text{co}_2}}{1 + \Phi_{\text{vp}} \cdot \frac{y_{\text{vp}}}{y_{\text{co}_2}}} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.1.5.4)$$

$\eta_{\text{vp}}$  [kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>] - Dynamická viskozita vodní páry

$\eta_{\text{co}_2}$  [kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>] - Dynamická viskozita oxidu uhličitého

$y_{\text{vp}}$  [-] - Molární podíl vodní páry v paroplynové směsi

$y_{\text{co}_2}$  [-] - Molární podíl oxidu uhličitého v paroplynové směsi

## 2.1.6 Kinematická viskozita paroplynové směsi

Kinematickou viskozitu potřebujeme k výpočtu Reynoldsova kritéria a odvodíme si ji ze vztahu (2.1.5) jako podíl dynamické viskozity paroplynové směsi a hustoty.

$$v_{sm} = \frac{\eta_{sm}}{\rho_{sm}} \quad [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (2.1.6)$$

Termodynamické vlastnosti paroplynové směsi jsou nezbytné pro výpočet bezrozměrných kritérií sloužící k výpočtu výměníku tepla (srážec přehřátí paroplynové směsi). V následujících výpočtech bilance paroplynového cyklu a výměníku tepla využijeme obecné vzorce ke skutečným číslům a grafům znázorňující průběh paroplynové směsi.

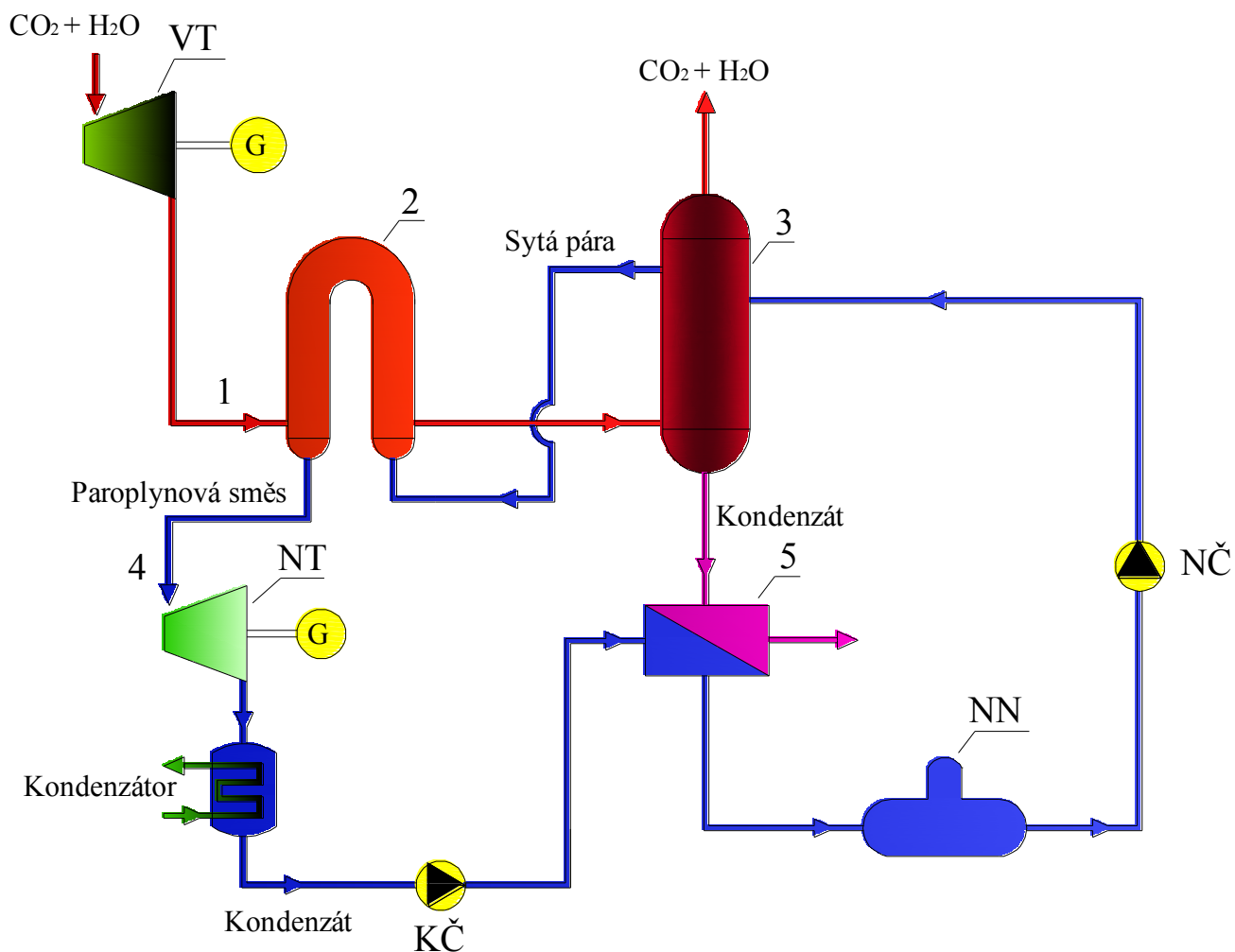
### 3 Navržení bezemisního parního cyklu CES

Pro stanovení základních parametrů srážec přehřátí navrhne vlastní schéma bezemisního parního cyklu podle zadání diplomové práce, které se bude skládat z vysokotlaké turbíny, ve které expanduje paroplynová směs, po částečné expanzi vstupuje do výměníku tepla (srážec přehřátí paroplynové směsi), kde se ochladí na požadovanou teplotu a vstoupí do separačního parogenerátoru. Zde se zchladí a částečně zkondenzuje vodní pára obsažená ve směsi, tímto kondenzačním teplem se ohřeje napájecí voda na saturační teplotu a vyrobí se sytá pára. Paroplynovou směs vystupující ze separačního parogenerátoru, která je z velké části zbavená vodní páry dále nevyužívám. Sytá pára vystupující ze separačního parogenerátoru je zavedena na výměníku tepla (srážec přehřátí paroplynové směsi) a je zahřívána na požadovanou teplotu přehřáté páry, následovně přehřátou páru zavádíme do nízkotlaké kondenzační turbíny. Po expanzi v nízkotlaké kondenzační turbíně proudí do kondenzátoru, kde změní své skupenství z mokré páry na kondenzát (voda). Kondenzát dále proudí pomocí kondenzačního čerpadla do regeneračního výměníku, který využívá teplo kondenzátu paroplynové směsi. Kondenzát se ve výměníku zahřeje nad teplotu odplynění a v napájecí nádrži odstraníme z kondenzátu (napájecí voda) kyslík. Napájecí voda pak proudí z napájecí nádrže přes čerpadlo zpátky do separačního parogenerátoru a celý oběh se opakuje.

#### 3.1 Navržení bezemisního paroplynového cyklu peach point metodou [1]

Jedná se o metodu bilancování energetického systému tak že si zvolíme rozdíl teplot paroplynové směsi a napájecí vody v určeném místě, v našem případě to bude vstupní teplota napájecí vody do separačního parogenerátoru a teplota paroplynové směsi při výstupu ze separačního parogenerátoru, tento rozdíl se nazývá peach point znázornění v grafu (obr. 3.1-1), který si můžeme zvolit třeba 15°C a celý systém energeticky propočítáváme, až se budou vstupní a výstupní energie rovnat. Hodnotu peach pointu můžeme pak měnit podle potřeby.

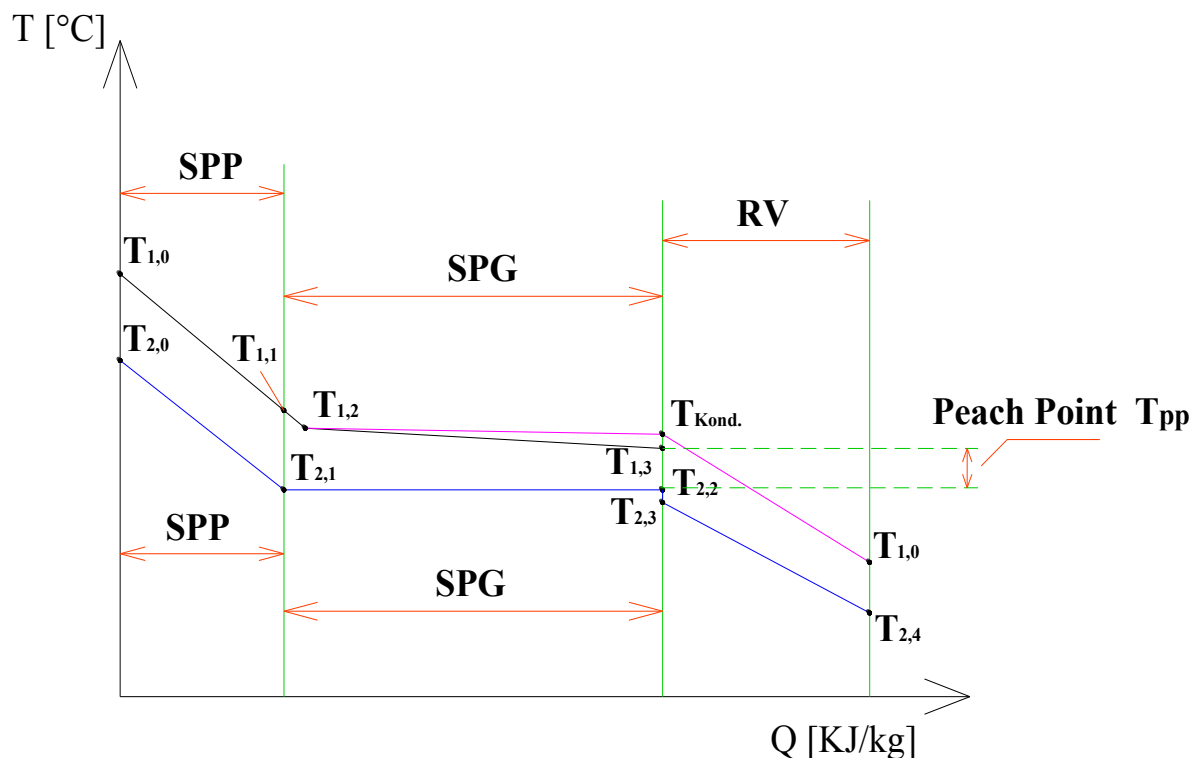
Navrhne si předběžný paroplynový systém se zapojenými zařízeními (obr. 3.1), kde musíme dodržet zadané parametry podle zadání diplomové práce.



*Obr. 3.1 Schéma zapojení jednotlivých zařízení v paroplynovém cyklu (1–zadané parametry paroplynové směsi, 2–Srážecí přehřátí, 3–Separační parogenerátor, 4–zadané parametry přehřáté páry, 5–regenerační výměník)*

Pro lepší pochopení výpočtu jsem nakreslil předběžný graf (obr. 3.2) průběhu tepla a předaný tepelný výkon. V grafu (obr. 3.2) jsou vyznačeny vstupní a výstupní teploty do jednotlivých zařízení teploty, při výpočtu parametrů jednotlivých ploch budu používat stejné označení jako v grafu.





Obr 3.2 Předběžné znázornění teploty a tepelného výkonu (SPP- srážec přehřátí paroplynové směsi, SPG-separační parogenerátor, RV-regenerační výměník)

Zadané hodnoty na straně syté páry:

$T_{2,0} = 360$  [°C] - Teplota přehřáté páry do nízkotlaké turbíny

$P_{sp} = 200$  [kPa] - Tlak syté páry, který se v systému nemění

Musíme si vyhledat saturační teplotu syté páry  $T_{2,1}$  při výstupu ze separačního parogenerátoru, tomuto úkolu nám postačí vědět tlak syté páry  $P_{sp}$  a podle toho si vyhledáme saturační teplotu v  $t_s$  diagramu nebo můžeme využít program EES.

$T_{2,1} = T_{sat}(\text{Steam\_IAPWS}; P = 400)$

$T_{2,1} = 120,2$  [°C] - Teplota syté páry při výstupu z SPG

$T_{sat}$  - Saturační teplota

$T_{2,2} = T_{2,1}$  [°C] - Teplota nasycené kapaliny v SPG

$T_{2,3} = 108$  [°C] - Vstupní teplota napájecí vody do SPG

$T_{2,4} = 42$  [°C] - Teplota kondenzátu

$T_{pp} = 5$  [°C] - Zvolený Peach Point znázornění v (obr. 3.1-1)

Zadané hodnoty na straně paroplynové směsi:

Paroplynovou směs tvoří vodní pára a oxid uhličitý, při vstupu do srážecí přehřátí je hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého 15 % a 85 % vodní páry, koncentrace směsi se ve srážecí přehřátí nemění, mění se až po zchladnutí směsi v separačním parogenerátoru na saturační teplotu a pak začne ve směsi kondenzovat vodní pára, kterou odvádíme odvodňovacími kanály, proto je v dalších částech separačního parogenerátoru koncentrace směsi jiná až po výstup ze separačního parogenerátoru kde už se nemění.

$W_{co2} = 0,15$  [kg/kg] - Hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého

$W_{vp} = 0,85$  [kg/kg] - Hmotnostní koncentrace vodní páry

$T_{1,0} = 380$  [°C] - Teplota paroplynové směsi z vysokotlaké turbíny

$P_{pp} = 400$  [kPa] - Celkový tlak paroplynové směsi

Paroplynová směs v separačním parogenerátoru se ochladí na saturační teplotu  $T_{1,2}$ , k vyhledání této teploty nám poslouží znát tlak  $P_{pp}$ , podle kterého si najdeme v programu EES saturační teplotu pro sytu páru v paroplynové směsi.

$T_{1,2} = T_{sat}(\text{Steam\_IAPWS}; P = P_{pp})$

$T_{1,2} = 143,6$  [°C] - Saturační teplota paroplynové směsi v bodě 1,2

$T_{sat}$  - Saturační teplota

Vypočítáme si entalpii paroplynové směsi při vstupu do srážecí přehřátí  $h_{1,0}$  a entalpii směsi při zchladnutí na saturační teplotu  $h_{1,2}$  v separačním parogenerátoru podle vztahu 2.1.3, koncentrace oxidu uhličitého a vodní páry je ještě stejná.

$h_{1,2} = 2341$  [KJ/kg] - Entalpie paroplynové směsi v bodě 1,2 v SPG

$h_{1,0} = 2800$  [KJ/kg] - Entalpie paroplynové směsi do srážecí přehřátí

Hmotnostní průtok paroplynové směsi ve srážecí přehřátí je stejný, mění se až v separačním parogenerátoru při zchladnutí směsi na saturační (kondenzační) teplotu jak bylo vysvětleno v předchozí fázi.

$m_{1,1} = 55,56$  [kg/s] - Hmotnostní průtok paroplynové směsi v bodě 1,1

$m_{1,0} = m_{1,1}$  [kg/s] - Hmotnostní průtok paroplynové směsi v bodě 1,0

Množství oxidu uhličitého ve směsi v průběhu celého oběhu se nemění.

$$m_{\text{co2-1,2}} = 8,334 \text{ [kg/s]} \quad - \text{ Hmotnostní průtok oxidu uhličitého v bodě 1,2}$$

Vypočítáme si hmotnostní průtok vodní páry v paroplynové směsi při vstupu do srážече přehřátí až po vstup do separačního parogenerátoru a zchlazení na saturační teplotu (kondenzační)  $m_{\text{vp-1,2}} = m_{\text{vp-1,0}} = m_{\text{vp-1,1}}$ , tak že odečteme od celkového hmotnostního průtoku paroplynové směsi průtok oxidu uhličitého, o kterém víme, že je zastoupený 15% hmotnostní koncentrace v paroplynové směsi.

$$m_{\text{vp-1,2}} = m_{11} - m_{\text{co2-1,2}}$$

$$m_{\text{vp-1,2}} = 47,53 \text{ [kg/s]} \quad - \text{ Hmotnostní průtok vodní páry v bodě 1,2}$$

### 3.1.1 Výpočet paroplynového cyklu

V první části výpočtu musíme zjistit, jaké hmotnostní množství paroplynové směsi nám vystupuje ze separačního parogenerátoru, k tomu potřebujeme znát Molekulovou hmotnost oxidu uhličitého a vodní páry, může si ji najít v tabulkách.

$$M_{\text{vp}} = 18 \text{ [kg/kmol]} \quad - \text{ Molární hmotnost vodní páry}$$

$$M_{\text{co2}} = 44 \text{ [kg/kmol]} \quad - \text{ Molární hmotnost oxidu uhličitého}$$

Určíme si molární průtok vodní páry a oxidu uhličitého na vstupu do separačního parogenerátoru

$$G_{\text{CO2-1,1}} = \frac{m_{\text{CO2-1,1}}}{M_{\text{CO2}}} \text{ [Kmol/s]} \quad (3.1.1.1)$$

$$G_{\text{vp-1,1}} = \frac{m_{\text{vp-1,1}}}{M_{\text{vp}}} \text{ [Kmol/s]} \quad (3.1.1.2)$$

Pomocí pinch point teploty  $T_{\text{pp}}$  jsme si určili teplotu paroplynové směsi  $T_{1,3}$  při výstupu z SPG která bude o  $5^\circ\text{C}$  větší než saturační teplota syté kapaliny  $T_{2,2}$  podle vztahu 3.1.3, najdeme parciální tlak syté páry v paroplynové směsi, který musí odpovídat saturační teplotě  $T_{1,3}$ .

$$T_{1,3} = T_{2,2} + T_{\text{pp}} \quad (3.1.1.3)$$

$T_{1,3} = 125,2$  [°C] - Teplota paroplynové směsi při výstupu z SPG

$$P_{pt, vp-1,3} = P_{sat}(Steam\_IAPWS; T = T_{1,3})$$

$$P_{pt, vp-1,3} = 233,7$$
 [kPa]

$P_{pt, vp-1,3}$  - Parciální tlak vodní páry při výstupu z SPG

Daltonův zákon nám říká, že součet parciálních tlaků jednotlivých složek se rovná celkovému tlaku směsi, celkový tlak směsi se nemění, proto si můžeme dopočítat parciální tlak oxidu uhličitého.

$$P_{CO2-1,3} = P_c - P_{vp-1,3} \quad (3.1.1.4)$$

$P_{CO2-1,3} = 166,3$  [kPa] - Parciální tlak oxidu uhličitého při výstupu z SPG

Posléze si spočítáme průtok páry na výstupu z SPG, množství oxidu uhličitého při vstupu do SPG a při výstupu se nemění  $G_{CO2-1,1} = G_{CO2-1,2} = G_{CO2-1,3}$

$$G_{vp-1,3} = G_{CO2-1,1} \cdot \frac{P_{pt, vp-1,3}}{P_{pt2, CO2-1,3}} \quad (3.1.1.5)$$

$G_{vp-1,3} = 0,2663$  [Kmol/s] - Molární průtok vodní páry při výstupu z SPG

Převědeme na hmotnostní průtok.

$$m_{vp-1,3} = G_{vp-1,3} \cdot M_{vp} \quad (3.1.1.6)$$

$m_{vp-1,3} = 4,793$  [kg/s] - Hmotnostní průtok vodní páry při výstupu z SPG

Celkové množství paroplynové směsi u výstupu z SPG

$$m_{1,3} = m_{vp-1,3} + m_{CO2-1,3} \quad (3.1.1.7)$$

$$m_{1,3} = 13,13$$
 [kg/s]

Hmotnostní rozdíl paroplynové směsi při vstupu do SPG a výstupu nám udává vzniklé množství kondenzátu ze SPG.

$$G_{\text{Kond-3}} = G_{\text{vp-1,1}} - G_{\text{vp-1,3}} \quad (3.1.1.8)$$

$$G_{\text{Kond-3}} = 2,357 \quad [\text{Kmol/s}] \quad - \text{ Molární průtok kondenzátu ze SPG}$$

Převědeme na hmotnostní průtok, kondenzát je voda, tak má stejnou molární hmotnost jako vodní pára.

$$m_{\text{Kond-3}} = G_{\text{Kond}} \cdot M_{\text{vp}} \quad (3.1.1.9)$$

$$m_{\text{Kond-3}} = 42,43 \quad [\text{kg/s}] \quad - \text{ Hmotnostní průtok kondenzátu ze SPG}$$

Pro výpočet entalpie paroplynové směsi v bodě při výstupu z SPG potřebujeme znát koncentraci složek směsi.

$$w_{\text{CO2-1,3}} = \frac{m_{\text{CO2-1,3}}}{m_{1,3}} \quad (3.1.1.10)$$

$$w_{\text{CO2-1,3}} = 0,3651 \quad [\text{kg/kg}] \quad - \text{ Hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého ze SPG}$$

$$w_{\text{vp-1,3}} = \frac{m_{\text{vp-1,3}}}{m_{1,3}} \quad (3.1.1.11)$$

$$w_{\text{vp-1,3}} = 0,6369 \quad [\text{kg/kg}] \quad - \text{ Hmotnostní koncentrace vodní páry ze SPG}$$

Známe parciální tlak vodní páry, teplotu a zjistíme entalpii vodní páry  $h_{\text{vp-1,3}}$  v tabulkách nebo použijeme odpovídající software (EES-profesionál), musíme zjistit také entalpii  $h_{\text{CO2-1,3}}$  stejným způsobem, stanovíme si i entalpii kondenzátu  $h_{\text{kond}}$ .

$$h_{\text{vp-1,3}} = \text{Enthalpy}(\text{Steam\_IAPWS}; P = P_{\text{pt, vp-1,3}}; x = 1)$$

$$h_{\text{vp-1,3}} = 2713 \quad [\text{kJ/kg}] \quad - \text{ Entalpie vodní pára při výstupu ze SPG}$$

$$h_{\text{CO2-1,3}} = \text{Enthalpy}(\text{CarbonDioxide}; T = T_{1,3}; P = P_{\text{pt, vp-1,3}})$$

$$h_{\text{CO2-1,3}} = 88,61 \quad [\text{kJ/kg}] \quad - \text{ Entalpie oxidu uhličitého při výstupu ze SPG}$$

Vypočítáme celkovou entalpii směsi při výstupu ze separačního parogenerátoru a použijeme vztah 2.1.3.

$$h_{1,3} = h_{vp-1,3} \cdot w_{vp-1,3} + h_{CO2-1,3} \cdot w_{CO2-1,3} \quad (2.1.3)$$

$$h_{1,3} = 1047 \quad [\text{kJ/kg}] \quad \text{- Entalpie paroplynové směsi při výstupu ze SPG}$$

Kondenzující vodní pára z paroplynové směsi začíná kondenzovat při chladnutí na saturační teplotu  $T_{\text{kond-3}}$ , v (obr. 3.1-2) vidíme, že teplota kondenzátu je o něco nižší, ve skutečnosti je teplota v každé odvodňovací přepážce v separačním parogenerátoru menší, ale pro naše výpočty budeme uvažovat o teplotě stejné jako je saturační teplota  $T_{\text{kond-3}}$  (výpočet teploty kondenzátu v jednotlivých částech separačního parogenerátoru je úkol hodný nové diplomové práce). Vyhledáme si v programu EES profesionál entalpii kondenzátu  $h_{\text{kond-3}}$  ze separačního parogenerátoru pomocí teploty  $T_{\text{kond-3}} = T_{1,2}$ , která je saturační.

$$h_{\text{Kond-3}} = \text{Enthalpy}(\text{Steam\_IAPWS}; T = T_{\text{Kond}}; x = 0)$$

$$h_{\text{Kond-3}} = 602 \quad [\text{kJ/kg}] \quad \text{-Entalpie kondenzátu při výstupu z SPG}$$

$$x = 0 \quad [-] \quad \text{-Suchost nasycené kapaliny}$$

Tedž si můžeme spočítat tepelný výkon paroplynové směsi na vstupu do srážecí přehrátky  $q_{1,0}$ , výkon směsi při chladnutí na saturační teplotu v separačním parogenerátoru, při výstup z SPG  $q_{1,3}$  a tepelný výkon kondenzátu  $q_{\text{Kond-3}}$ .

$$q_{1,0} = m_{1,0} \cdot h_{1,0} \quad (3.1.1.12)$$

$$q_{1,0} = 155568 \quad [\text{kJ/s}] \quad \text{-Tepelný výkon paroplynové směsi do srážecí přehrátky}$$

$$q_{1,2} = m_{1,0} \cdot h_{1,2} \quad (3.1.1.13)$$

$$q_{1,2} = 134863 \quad [\text{kJ/s}] \quad \text{-Tepelný výkon paroplynové směsi při zchladnutí na saturační teplotu v SPG}$$

$$q_{1,3} = m_{1,3} \cdot h_{1,3} \quad (3.1.1.14)$$

$$q_{1,3} = 13745 \quad [\text{kJ/s}] \quad \text{-Tepelný výkon paroplynové směsi z SPG}$$

$$q_{\text{Kond-3}} = m_{\text{Kond}} \cdot h_{\text{Kond}} \quad (3.1.1.15)$$

$$q_{\text{Kond-3}} = 25546 \quad [\text{kJ/s}] \quad \text{-Tepelný výkon kondenzátu z SPG}$$

Spočítáme si celkové množství předaného tepla paroplynové směsi vodní páře od vstupu do srážecí přehřátí až po výstup paroplynové směsi z SPG. Výpočet spočítá v odečtení tepelného výkonu a výkonu paroplynové směsi od vstupního výkonu paroplynové směsi do srážecí přehřátí.

$$Q_{\text{pp1,01,3}} = q_{1,0} - q_{1,3} - q_{\text{Kond-3}}$$

$$Q_{\text{pp1,01,3}} = 116277 \quad [\text{kJ/s}] \quad \begin{array}{l} \text{-Množství předaného tepla od vstupu} \\ \text{paroplynové směsi do srážecí přehřátí} \\ \text{až po výstup ze SPG a odečtení množství} \\ \text{tepla odvádějící kondenzátem.} \end{array}$$

Pro výpočet stejného množství tepla převedeného na straně vodní páry si zjistíme potřebné entalpie v programu EES profesionál. Známe tlak vodní páry, které se v systému nemění, teplotu výstupní přehřáté páry ze srážecí přehřátí  $T_{2,0}$  kterou jsme si zvolili o 20°C menší než je vstupní teplota paroplynové směsi  $T_{1,0}$ , vstupní teplota vodní páry do srážecí přehřátí  $T_{2,1}$  je zároveň výstupní teplotou ze SPG a musí se rovnat saturační teplotě páry při tlaku  $P_{\text{vp}}$ , teplota vstupní napájecí vody musí být alespoň 105 °C pro odplynění, proto volíme  $T_{2,3}$  o 3°C více než je teplota doplynění. Teplota vstupní vody se musí nejprve ohřát na saturační teplotu a pak může začít proces odpařování.

$$h_{2,0} = \text{Enthalpy}(\text{Steam\_IAPWS}; T = T_{2,0}; P = P_{\text{sp}})$$

$$h_{2,0} = 3194 \quad [\text{kJ/kg}] \quad \text{-Entalpie přehřáté páry ze srážecí přehřátí}$$

$$h_{2,1} = \text{Enthalpy}(\text{Steam\_IAPWS}; P = P_{\text{sp}}; x = 1)$$

$$h_{2,1} = 2706 \quad [\text{kJ/kg}] \quad \text{-Entalpie syté páry do srážecí přehřátí}$$

$$x = 1 \quad [-] \quad \text{-Suchost nasycené vodní páry}$$

$$h_{2,2} = \text{Enthalpy}(\text{Steam\_IAPWS}; P = P_{\text{sp}}; x = 0)$$

$h_{2,2} = 504,7$  [kJ/kg] -Entalpie napájecí vody na saturační teplotě

$x = 0$  [-] -Suchost nasycené napájecí vody

$h_{2,3} = \text{Enthalpy}(\text{Steam\_IAPWS}; T = T_{2,3}; x = 0)$

$h_{2,3} = 453$  [kJ/kg] -Entalpie napájecí vody při vstupu do SPG

Napájecí voda vstupující do regeneračního ohříváku v bodě 2,4 má teplotu 42°C, její tlak je součtem hydrostatického tlaku + tlak v napájecí nádrži + ztráty které zanedbáváme. Tlak se rovna  $p = 140$  [kPa].

$h_{2,4} = \text{Enthalpy}(\text{Steam\_IAPWS}; T = T_{2,4}; P = 140)$

$h_{2,4} = 176$  [kJ/kg] -Entalpie napájecí vody před regeneračním ohřívákem

Tepelná bilance se musí rovnat na straně paroplynové směsi a vodní páry  $Q_{pp1,0-1,3} = Q_{sp2,0-2,3}$  a tak si můžeme spočítat z tepelné bilance množství syté páry.

$$Q_{sp2,0-2,3} = m_{sp} \cdot (h_{2,0} - h_{2,3}) \quad (3.1.1.16)$$

$m_{sp} = 42,41$  [kg/s] -Množství vytvořené syté páry

Dále si spočítáme tepelný výkon vstupní napájecí vody  $q_{2,3}$  tepelný výkon kondenzátu  $q_{2,4}$  výkon výstupní syté páry z SPG  $q_{2,1}$  a výkon výstupní přehřáté páry vstupující na nízkotlakou turbínu  $q_{2,0}$  z těchto hodnot může sestavit graf napájecí vody v závislosti teploty na tepelném výkonu.

$$q_{2,3} = m_{sp} \cdot h_{2,3} \quad (3.1.1.17)$$

$q_{2,3} = 19212$  [kJ/s] -Tepelný výkon napájecí vody do SPG

$$q_{2,4} = m_{sp} \cdot h_{2,4} \quad (3.1.1.18)$$

$q_{2,4} = 7465$  [kJ/s] -Tepelný výkon napájecí vody před regeneračním ohřívákem



$$q_{2,1} = m_{sp} \cdot h_{2,1} \quad (3.1.1.19)$$

$$q_{2,1} = 114784 \text{ [kJ/s]} \quad \text{-Tepelný výkon syté páry do srážecí přehřátí}$$

$$q_{2,0} = m_{sp} \cdot h_{2,0} \quad (3.1.1.20)$$

$$q_{2,0} = 135489 \text{ [kJ/s]} \quad \text{-Tepelný výkon přehřáté páry ze srážecí přehřátí}$$

Množství předaného tepla paroplynovou směsí ve srážecí přehřátí se musí rovnat množství tepla přivedeného syté páře a tak si můžeme spočítat tepelný výkon paroplynové směsi při výstupu ze srážecí přehřátí  $q_{1,1}$  a její entalpii  $h_{1,1}$ .

$$Q_{1,0-1,1} = Q_{2,0-2,1} = m_{sp} \cdot (h_{2,0} - h_{2,1}) = q_{2,0} - q_{2,1} \quad (3.1.1.21)$$

$$Q_{1,0-1,1} = m_{1,0} \cdot (h_{1,0} - h_{1,1}) \Rightarrow h_{1,1} = h_{1,0} - \frac{Q_{1,0-1,1}}{m_{1,0}}$$

Entalpii můžeme spočítat taky pomocí tepelných výkonů, od vstupního tepelného výkonu paroplynové směsi  $q_{1,0}$  odečteme množství potřebné pro přehřátí syté páry  $q_{2,0}-q_{2,1}$ .

$$q_{1,1} = q_{1,0} - (q_{2,0} - q_{2,1}) = m_{1,0} \cdot h_{1,1} \quad (3.1.1.22)$$

$$q_{1,1} = 155568 - (135489 - 114784)$$

$$q_{1,1} = 134863 \quad \text{[kJ/s]} \quad \text{-Tepelný výkon paroplynové směsi ze srážecí přehřátí}$$

Dosadíme a spočítáme entalpii:

$$h_{1,1} = \frac{q_{1,1}}{m_{1,0}} = 2427 \quad \text{[kJ/kg]} \quad \text{-Entalpie paroplynové směsi ze srážecí přehřátí, tomu odpovídá } T_{1,1} = 184,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Po částečné kondenzaci paroplynové směsi SPG získáme kondenzát, který má ještě značnou tepelnou energii, tento kondenzát použijeme pro ohřátí napájecí vody na teplotu  $T_{2,3}$  a tím zvýšíme účinnost celého cyklu a nemusíme použít jiný zdroj k zahřátí napájecí vody nad

teplotu odplynění. Množství potřebného tepla pro ohřátí napájecí vody s teploty  $T_{2,4}$  na  $T_{2,3}$  se musí rovnat množství tepla předaného kondenzátem.

$$Q_{2,3-2,4} = Q_{\text{Kond},3-\text{Kond},4} = m_{\text{sp}} \cdot (h_{2,3} - h_{2,4}) \quad (3.1.1.23)$$

$$Q_{2,3-2,4} = Q_{\text{Kond},3-\text{Kond},4} = 128021 [\text{kJ/s}] \quad \text{-Množství tepla pro ohřátí napájecí vody na } 108^\circ\text{C}$$

Spočítáme si tepelný výkon kondenzátu  $q_{\text{Kond}-4}$ , který už předal část svého tepla napájecí vodě podle vztahu 3.1.23

$$q_{\text{Kond}-4} = q_{\text{Kond}-3} - (q_{2,3} - q_{2,4}) \quad (3.1.1.24)$$

$$q_{\text{Kond}-4} = 13802 \quad [\text{kJ/s}] \quad \text{-Tepelný výkon kondenzátu při výstupu z Regeneračního ohříváku}$$

Spočítáme si výslednou teplotu kondenzátu v bodě  $T_{\text{Kond}-4}$ , když si vypočítám entalpii kondenzátu  $h_{\text{Kond}-4}$ , tak si v tabulkách nebo v programu EES zjistíme odpovídající teplotu.

$$h_{\text{Kond}-4} = \frac{q_{\text{Kond}-4}}{m_{\text{Kond}}} \quad (3.1.1.25)$$

$$h_{\text{Kond}-4} = 325,3 \quad [\text{kJ/kg}] \quad \text{-Entalpie kondenzátu při výstupu z regeneračního ohříváku}$$

$$T_{\text{Kond}-4} = \text{Temperature}(\text{Steam\_IAPWS}; h = h_{\text{Kond}-4}; x = 0)$$

$$T_{\text{Kond}-4} = 77,68 \quad [^\circ\text{C}] \quad \text{-Teplota kondenzátu při výstupu z regeneračního ohříváku}$$

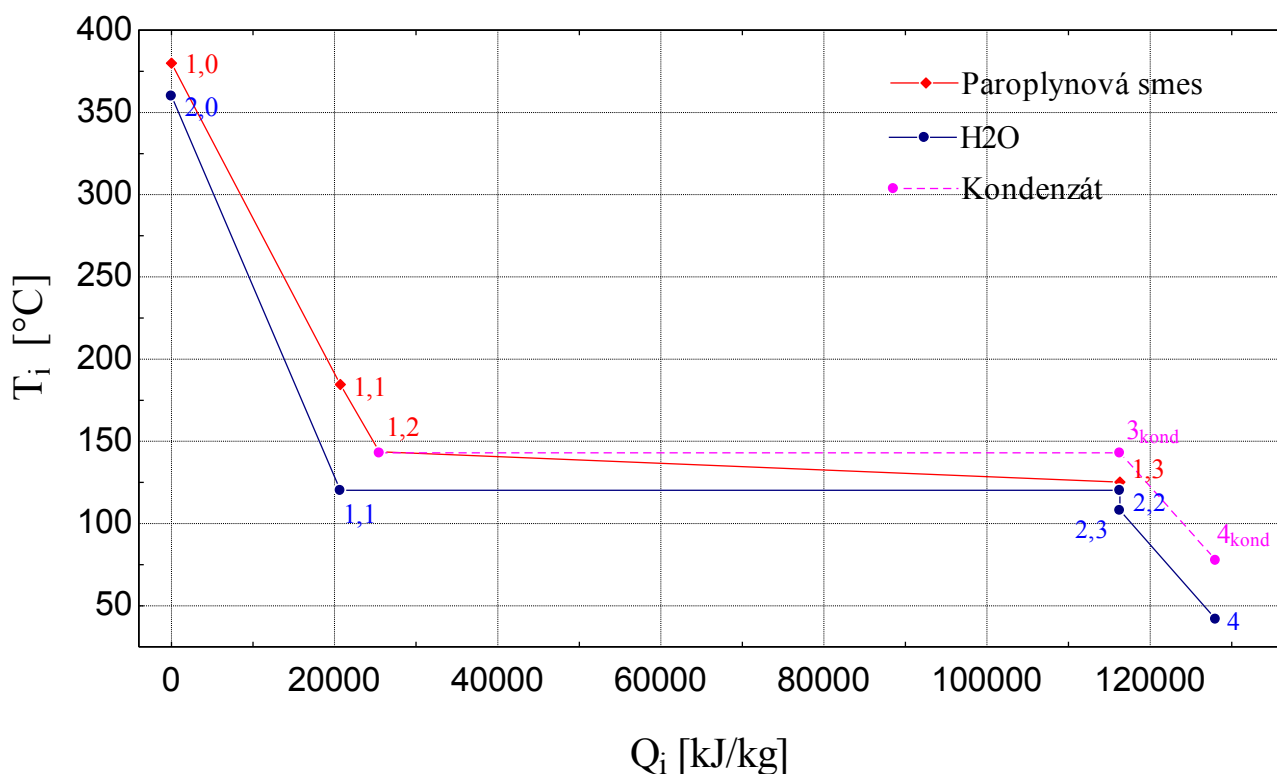
$$\text{Temperature} \quad \text{-Teplota}$$

Teplota kondenzátu je ještě dosti vysoká a tak můžeme uvažovat s dalším technologickým využitím.

Vypočítané hodnoty zpracujeme do tabulky a sestrojíme grafy  $T-q$  a  $T-Q$  pro znázornění tepelného průběhu paroplynové směsi a napájecí vody. Pro vytvoření  $T-Q$  diagramu si vypočítáme zbývající předané množství tepla  $Q_i$  na straně paroplynové směsi a napájecí vody.

Body	$h_{1,i}$ [kJ/kg]	$h_{2,i}$ [kJ/kg]	$h_{kond,i}$ [kJ/kg]	$q_{1,i}$ [kJ/s]	$q_{2,i}$ [kJ/s]	$q_{kond,i}$ [kJ/s]	$Q_{kond,i}$ [kJ/s]	$Q_{1,i}$ [kJ/s]	$Q_{2,i}$ [kJ/s]	$T_{1,i}$ [°C]	$T_{2,i}$ [°C]	$T_{kond,i}$ [°C]
0	2800	3194		155568	135489			0	0	380	360	
1	2427	2706		134863	114784			20705	20705	167	120,2	
2	2341	504,7		130066	19212	130066	25502	25502	116277	143,6	120,2	143
3	1047	453	602	13745	19212	25546	116277	116277	116277	125,2	108	143
4		176	325,2		7465	13800	128024		128024		42	77,67

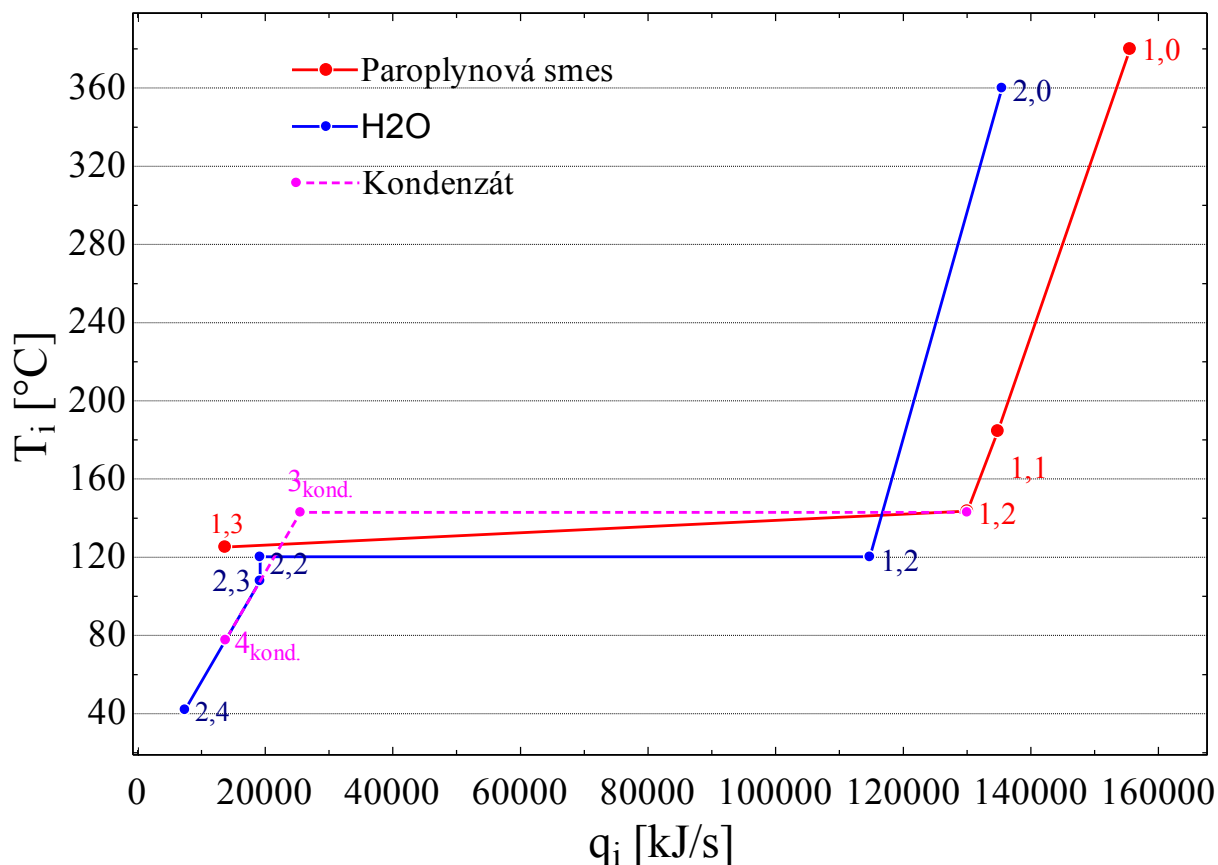
Tab. 3-1 Vypočítané hodnoty paroplynového cyklu v jednotlivých místech



Obr. 3.3 Znázorňující množství předaného tepla v závislosti na teplotě v navrženém paroplynovém cyklu vypočítaných v programu EES

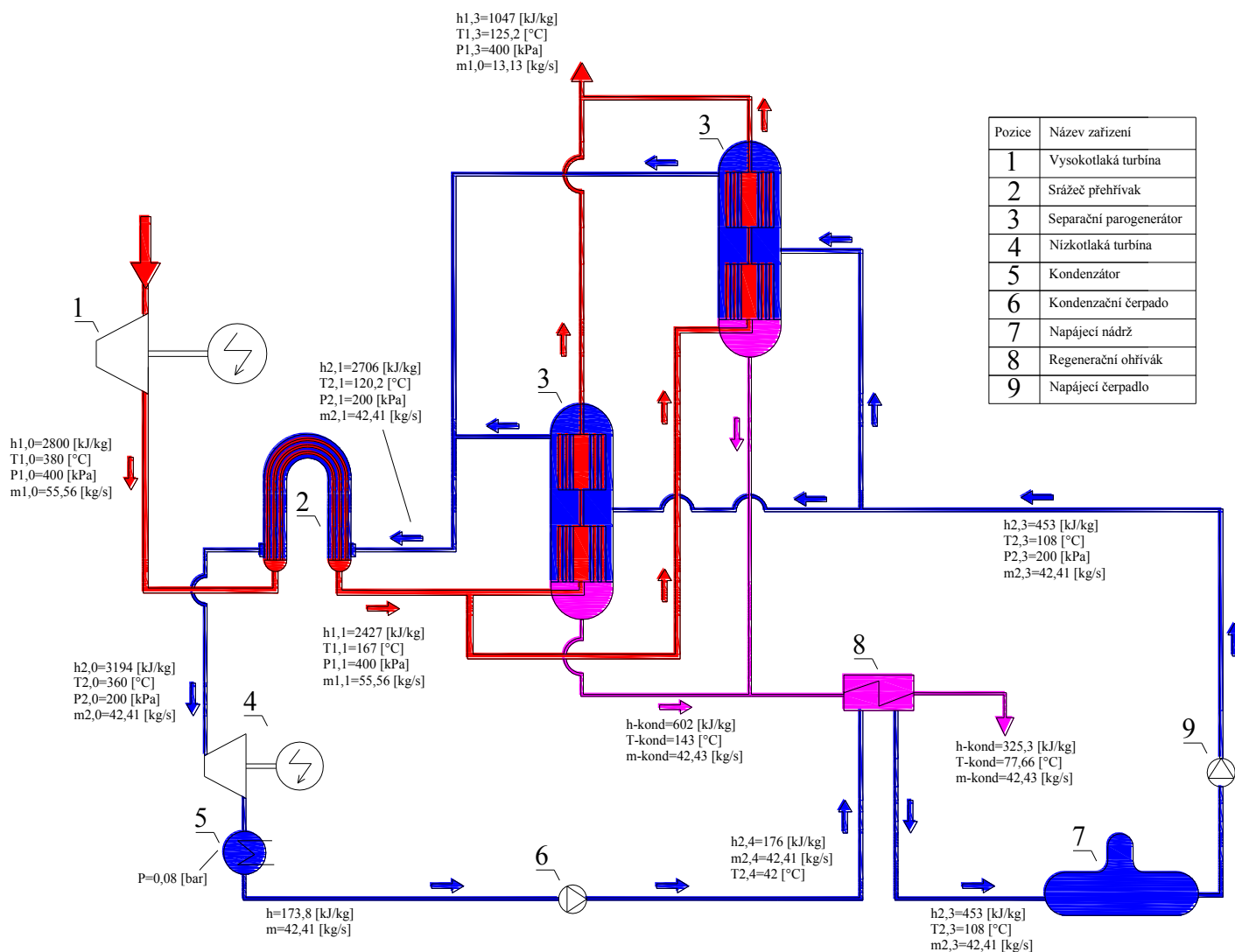
Tento graf (obr. 3.3) je vytvořený z mých vypočítaných hodnot a můžeme ho považovat za skutečný, ale když ho srovnáme s předběžným graf (obr. 3.2) vidíme, že jsou si podobné, ale růžová křivka označující průběh kondenzátu je ve skutečném diagramu od bodu 1,2 do bodu 3<sub>kond</sub> rovná a neklesá u předběžného diagramu jsem ji nakreslil mírně dolů, protože teplota kondenzátů v každém místě odběru v separačním parogenerátoru je menší, tedy i u skutečného grafu (obr. 3.3) by měla mírně klesat, ale jak už jsem řekl v předchozích části, stanovení průběhu teploty kondenzátu není předmětem mé diplomové práce. Nyní si můžeme

stejným způsobem v programu EES vypočítat graf znázorňující tepelné výkony jednotlivých medií v jednotlivých bodech v závislosti na teplotě.



Obr 3.4 Znázorňující tepelné výkony v jednotlivých částech paroplynového cyklu v závislosti na teplotě vypočítaný v programu EES

Z uvedených výsledku a grafů nakreslím technologické schéma bezemisního parního cyklu CES v programu AutoCAD. Pro lepší znázornění můžeme spatřit schéma v příloze [A] ve formátu A2. Ve schématu můžeme shlédnout zapojení jednotlivých zařízení včetně technických parametrů medií, jako je teplota, tlak, entalpie a průtočné množství.

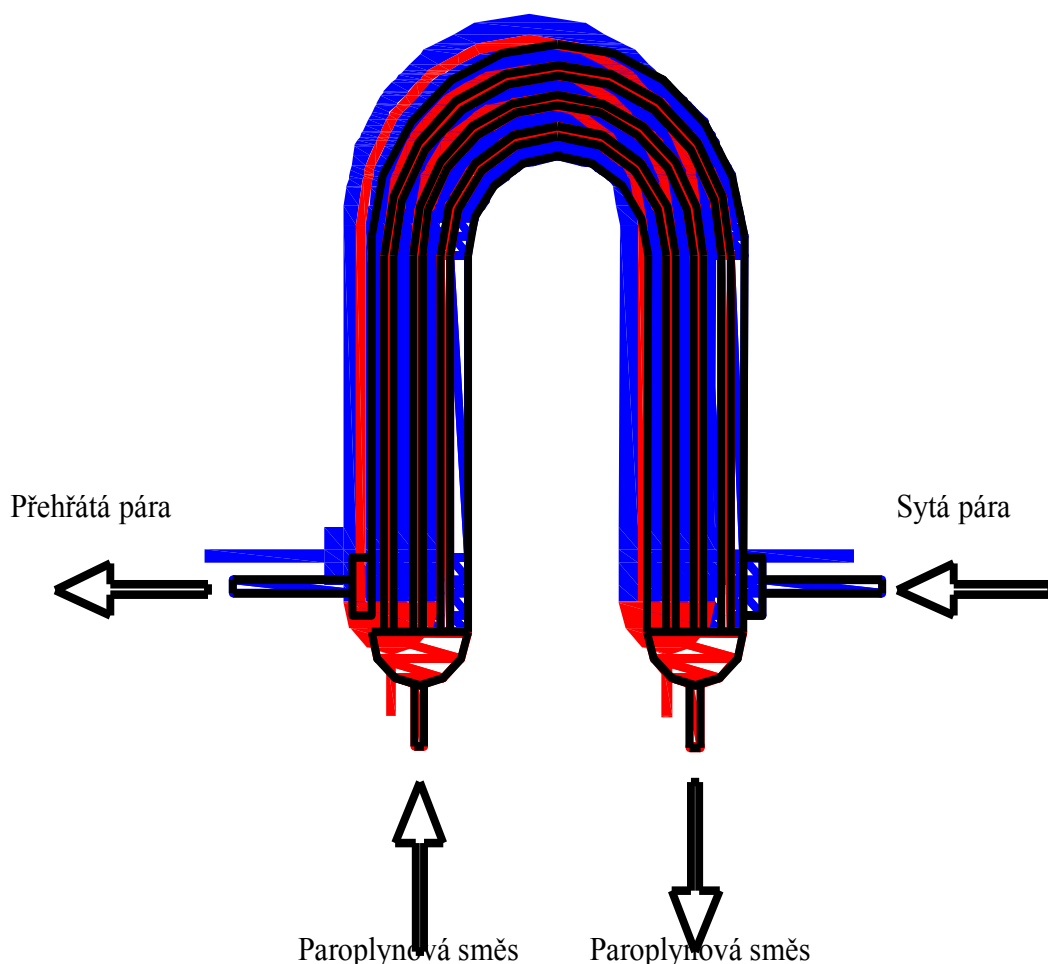


Obr. 3.5 Technologické schéma navrženého bezemisního parního cyklu CES [A]

Při návrhu bezemisního parního cyklu zanedbáváme tlakové a veškeré tepelné ztráty. Navrzení paroplynového cyklu slouží k následnému výpočtu výměníku tepla (srážec přehřátí) na schématu znázorněné bodem 1, ale také slouží k vysvětlení návrhu tepelných cyklů peach point metodou. Při návrhu a výpočtech jsem vycházel ze zadaných parametrů vstupních a výstupních medií, také jsem musel zjednodušit jednotlivé zařízení a volit idealizované řešení pro snadnější výpočty, například idealizovaná nízkotlaká turbína a chlazení kondenzátu mořskou vodou. Veškeré výpočty jsem prováděl v programu EES profesionál, ve kterém je znázorněn celý postup výpočtů, z následných vypočítaných hodnot dokáže program vytvořit grafy (obr. 3.3 a 3.4), soubor EES v elektronické podobě patří k diplomové práci, můžeme ho najít v příloze a následně spustit na počítači, který má nainstalovaný program EES.

#### 4 Návrh srážece přehřátí paroplynové směsi

Zapojení srážecí přehřívák vidíme na (obr. 3.1) a také na (obr. 3.5). Paroplynová směs proudí v trubkách, sytá pára v mezitrubkovém prostoru. Obtékání je podélné, čistý protiproud. Sytá pára ve výměníku přehřejeme a dále proudí jako přehřátá pára na nízkotlakou turbínu.



*Obr. 4.1 Náčrt srážece přehřátí paroplynové směsi v paroplynovém cyklu*

Konstrukce zařízení spěje do tvaru U, protože ve výměníku bude probíhat velké pnutí materiálu kvůli rozdílným teplotám medií, v takovém tvaru jako na (obr. 4.1) může materiál dobře dilatovat, aniž by došlo k poškození, zkroucení trubkovnice a deformacím další části výměníku. Zahnutím výměníku také docílíme zmenšení celkové délky, ale zvětší se jeho šířka. Pro výpočet a návrh srážecí přehřátí potřebujeme znát vstupní a výstupní hodnoty obou

medii, pro tento úkol jsem vypočítal a navrhl bezemisní parní cyklus a budu vycházet ze vstupních a výstupních hodnot tohoto cyklu.

#### 4.1 Výpočet termodynamických vlastností ve srážeci přehřátí [4] [5]

Paroplynová směs, která se ochlazuje ve výměníku, bude mít vstupní a výstupní parametry stejné jako u vypočítaného cyklu v předešlé části a proto stanovíme výpočtem vstupní a výstupní parametry syté páry. Spočítáme termodynamické vlastnosti paroplynové směsi a syté páry uvnitř výměníku, které použijeme do grafu, abychom viděli jak se určité vlastnosti paroplynové směsi a syté páry mění s teplotou, dále pak můžeme posoudit, které z vlastností nám ovlivňují velikost výměníku a další vlastnosti. Vypočítané termodynamické hodnoty potřebujeme pro výpočet transportních vlastností obou medií a pro výpočet bezrozměrných kritérií.

Zadané a vypočítané hodnoty paroplynové směsi viz kap. 3

$T_{1,0} = 380$	[°C]	- Teplota paroplynové směsi do srážeci přehřátí
$T_{1,1} = 167$	[°C]	- Teplota paroplynové směsi ze srážeci přehřátí
$W_{co2} = 0,15$	[kg/kg]	- Hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého
$W_{vp} = 0,85$	[kg/kg]	- Hmotnostní koncentrace vodní páry
$P_{pp} = 400$	[kPa]	- Celkový tlak paroplynové směsi
$m_{pp} = 42,41$	[kg/s]	- Hmotnostní průtok paroplynové směsi

Zadané a vypočítané hodnoty syté páry:

$T_{2,0} = 360$	[°C]	- Teplota přehřáté páry do nízkotlaké turbíny
$P_{sp} = 200$	[kPa]	- Tlak syté páry, který se v systému nemění
$T_{2,1} = 120,2$	[°C]	- Teplota syté páry při vstupu do srážeci přehřátí
$m_{sp} = 42,41$	[kg/s]	- Hmotnostní množství syté páry

Další potřebné hodnoty pro výpočet si musíme najít v termodynamických tabulkách nebo v patřičných diagramech, můžeme použít i program EES.

$$M_{\text{co}_2} = 44,01 \quad [\text{kg/kmol}]$$

- Molární hmotnost oxidu uhličitého

$$M_{\text{vp}} = 18,02 \quad [\text{kg/kmol}]$$

- Molární hmotnost vodní páry

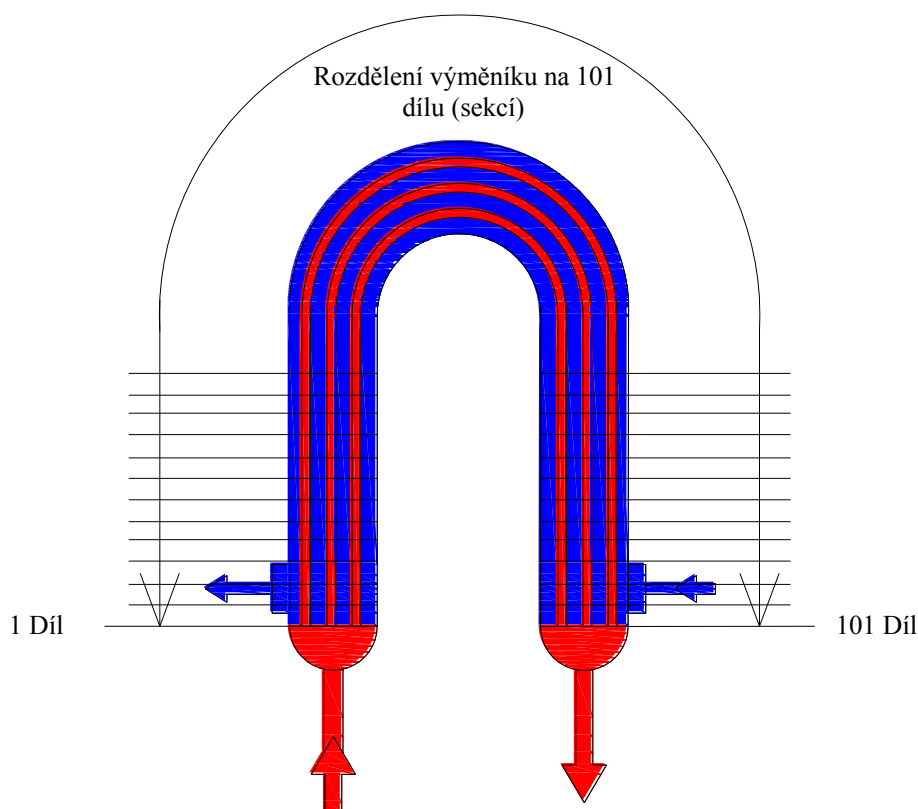
$$r_{\text{co}_2} = 188,8 \quad [\text{kJ/kg.K}]$$

- Měrná plynová konstanta oxidu uhličitého

$$r_{\text{vp}} = 461,5 \quad [\text{kJ/kg.K}]$$

- Měrná plynová konstanta vodní páry

Rozdělíme si výměník na 101 části přitom body 1 a 2 budou vstupní a výstupní hodnoty paroplynové směsi stejně tak i u vstupní syté páry a výstupní přehřáté páry, ale s opačným pořadím. Vypočítám v každém bodě termodynamické vlastnosti paroplynové směsi a syté páry, abychom mohli sestavit grafy, také můžeme hodnoty zprůměrovat a dále použít jako střední hodnoty pro výpočty ve sdílení tepla.



*Obr. 4.2 rozdělení výměníku na 101 sekcí*

Výpočty a vzorce použijeme podle stejné teorie, jako v předešlé části 2.1 kde je obecně naznačeno jak spočítat termodynamické vlastnosti paroplynové směsi, jako první výpočet si spočítáme parciální tlak oxidu uhličitého a vodní páry, parciální tlak obou složek se ve



výměníku nemění, protože celkový tlak zůstává stejný a koncentrace obou složek je také stejná.

#### 4.1.1 Parciální tlak vodní páry a oxidu uhličitého

$$p_{vp-1} = p_{pp} \cdot \left[ 1 - \frac{w_{co_2} \cdot r_{co_2}}{w_{co_2} \cdot r_{co_2} + w_{vp} \cdot r_{vp}} \right] \quad (4.1.1.1)$$

$$p_{vp-1} = 373,1 \quad [\text{kPa}] \quad \text{-Parciální tlak vodní páry v sekci 1}$$

$$p_{co2-1} = p_{pp} - p_{vp} \quad (4.1.1.2)$$

$$p_{co2-1} = 26,93 \quad [\text{kPa}] \quad \text{-Parciální tlak oxidu uhličitého v sekci 1}$$

Parciální tlak je ve všech místech stejný můžeme tedy napsat:

$$p_{vp-1} = p_{vp-101} = p_{vp-i}$$

$$p_{co2-1} = p_{co2-101} = p_{co2-i}$$

#### 4.1.2 Hustota paroplynové směsi a syté páry

Hustota směsi je závislá na teplotě tak i hustota syté páry, proto si rozdělíme teplotu ve výměníku tak, aby v každé sekci měnila teplota přibližně o 2°C, to znamená, že teplota paroplynové směsi bude o 2°C klesat a naopak teplota syté páry bude růst, abychom mohli provádět tyto výpočty je nezbytné požit výpočetní program například Excel, Matlab a další programy, já použiji EES profesionál, následné rozdělení teplot bude matematickým zápisem vypadat takto.

U paroplynové směsi:

$$\Delta T_{vp} = (t_{vp-1} - t_{vp-101})/100 \quad (4.1.2.1)$$

$$\Delta T_{co2} = (t_{co2-1} - t_{co2-101})/100 \quad (4.1.2.2)$$

$$\Delta T_{at} \quad \text{-Rozdíl teplot teplot v každé sekci výměníku}$$

Teplota obou složek je stejná je daná teplotou paroplynové směsi, tak není potřeba určovat rozdíl teplot u každé složky zvlášť, protože jsou stejné.

$$t_{vp-1} = t_{1,0} = t_{co2-1}$$

$$t_{vp-101} = t_{1,1} = t_{co2-101}$$

Pro sytou páru:

$$\Delta t_{sp} = (t_{sp-1} - t_{sp-101})/100 \quad (4.1.2.3)$$

U syté páry nám rozdíl vychází záporný, je to správně, protože sytá pára nám do výměníku vstupuje na opačném konci a bude se ohřívat ne chladnout jak paroplynová směs.

$$t_{sp-1} = t_{2,0}$$

$$t_{sp-101} = t_{2,1}$$

Hustotu směsi můžeme spočítat podle stavové rovnice, kdy za tlak dosazujeme parciální tlak obou složek a teplotu musíme převést na termodynamickou v kelvinech.

$$T_{vp-1} = t_{vp-1} + 273,15 = T_{sm-1} = T_{co2-1} \quad (4.1.2.4)$$

$$T_{vp-101} = t_{vp-101} + 273,15 = T_{sm-101} = T_{co2-101} \quad (4.1.2.5)$$

Aby nám program počítal teploty ve zbývajících bodech tedy od bodu 2 do 100 musíme napsat kritérium Duplicate i = 2;100

$$T_{vp-i} = t_{vp-i} + 273,15 = T_{sm-i} = T_{co2-i} \quad (4.1.2.6)$$

Nyní můžeme spočítat hustotu směsi:

$$\rho_{sm-1} = \frac{p_{co2-1}}{r_{co2} \cdot T_{sm-1}} + \frac{p_{vp-1}}{r_{vp} \cdot T_{sm-1}} \quad (4.1.2.7)$$

$$\rho_{sm-1} = 1,456 \quad [\text{kg/m}^3]$$

- Hustota paroplynové směsi v prvním sekci

$$\rho_{sm-101} = \frac{p_{co2-101}}{r_{co2} \cdot T_{sm-101}} + \frac{p_{vp-101}}{r_{vp} \cdot T_{sm-101}} \quad (4.1.2.8)$$

$\rho_{sm-1} = 1,456 \quad [kg/m^3]$  - Hustota paroplynové směsi v poslední sekci

$$\rho_{sm-i} = \frac{p_{co2-i}}{r_{co2} \cdot T_{sm-i}} + \frac{p_{vp-i}}{r_{vp} \cdot T_{sm-i}} \quad (4.1.2.9)$$

$\rho_{sm-i} \quad [kg/m^3]$  - Hustota paroplynové směsi v sekci od 2 až po 100

Poznámka: Parciální tlaky obou medií musíme dosazovat v základních jednotkách

Hustotu vstupní syté páry a výstupní přehřáté páry si jednoduše najdeme pomocí teploty a tlaku, který se ve výměníku nemění.

$\rho_{sp}[1] = \text{Density}(\text{Steam\_IAPWS}; T = t_{2,1}; P = p_{sp})$

$\rho_{sp}[1] = 1,129 \quad [kg/m^3]$  - Zápis pro hustotu vodní páry v programu EES pro první sekci na opačné straně výměníku

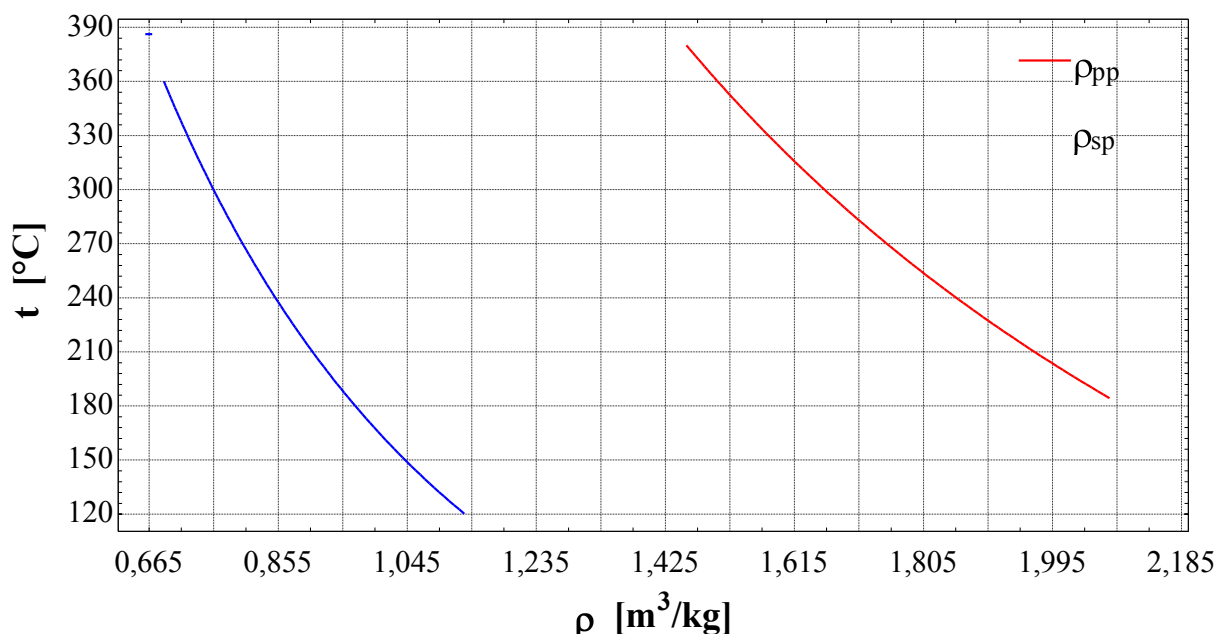
$\rho_{sp}[101] = \text{Density}(\text{Steam\_IAPWS}; T = t_{2,0}; P = p_{sp})$

$\rho_{sp}[101] = 0,6867 \quad [kg/m^3]$  - Zápis pro hustotu vodní páry v programu EES pro poslední sekci na začátku výměníku

$\rho_{sp}[i] = \text{Density}(\text{Steam\_IAPWS}; T = t_{2,i}; P = p_{sp})$

$\rho_{sp}[101] \quad [kg/m^3]$  - Zápis pro hustotu vodní páry v programu EES pro sekce od 2 až 100.

Za každou veličinou píšeme v programu EES hranatou závorku, je to proto, abych dostal vypočítané hodnoty do tabulky a následně mohl vytvořit grafy.



Obr. 4.3 Závislosti hustoty paroplynové směsi a syté páry na teplotě vypočítané v programu EES

Z grafu (obr. 4.3) je patrné, že hustota syté páry, tak i paroplynové směsi ve srážeci přehřátí klesá s rostoucí teplotou a naopak roste s ubývajícím teplotou.

#### 4.1.3 Entalpie paroplynové směsi a syté páry ve srážeci přehřátí

Entalpii nebudeme počítat, ale vyhledáme si ji v termodynamických tabulkách jak pro vodní páru, tak i pro oxid uhličitý, entalpie je závislá na teplotě a tlaku, budeme postupovat stejně jak předchozí části 2.1.3 a to tak, že si ji vyhledám v programu EES.

Pro paroplynovou směs:

$$h_{vp-1} = \text{Enthalpy}(\text{Steam\_IAPWS}; T = t_{vp-1}; P = P_{vp})$$

$$h_{vp-1} = 3233 \quad [\text{kJ/kg}] \quad - \text{Entalpie vodní páry v první sekci}$$

$$h_{co2-1} = \text{Enthalpy}(\text{CarbonDioxide}; T = t_{co2-1}; P = p_{co2-1})$$

$$h_{co2-1} = 351,2 \quad [\text{kJ/kg}] \quad - \text{Entalpie oxidu uhličitého v první sekci}$$

$$h_{sm-1} = W_{CO_2} \cdot h_{CO_2-1} + W_{vp} \cdot h_{vp-1} \quad (2.1.3)$$

$$h_{sm-1} = 2800 \quad [kJ/kg] \quad - \text{Entalpie paroplynové směsi v první sekci}$$

Analogický postupuji pro poslední sekci výměníku a pro sekce od 2 až do 100, tedy vypíšu akorát vypočítané hodnoty.

$$h_{vp-101} = 2792 \quad [kJ/kg] \quad - \text{Entalpie vodní páry v poslední sekci}$$

$$h_{co2-101} = 129,2 \quad [kJ/kg] \quad - \text{Entalpie oxidu uhličitého v poslední sekci}$$

$$h_{sm-101} = 2393 \quad [kJ/kg] \quad - \text{Entalpie paroplynové směsi v poslední sekci}$$

$$h_{vp-i} = \text{Enthlpy}(\text{Steam\_IAPWS}; T = t_{vp-i}; P = P_{vp})$$

$$h_{vp-i} \quad [kJ/kg] \quad - \text{Entalpie vodní páry od 2 až do 100 sekce}$$

$$h_{co2-i} = \text{Enthalpy}(\text{CarbonDioxide}; T = t_{co2-i}; P = p_{co2-i})$$

$$h_{co2-i} \quad [kJ/kg] \quad - \text{Entalpie oxidu uhličitého od 2 až do 100}$$

$$h_{sm-i} = W_{CO_2} \cdot h_{CO_2-i} + W_{vp} \cdot h_{vp-i} \quad (2.1.3)$$

$$h_{sm-i} = 2800 \quad [kJ/kg] \quad - \text{Entalpie paroplynové směsi od 2 až do 100 sekce}$$

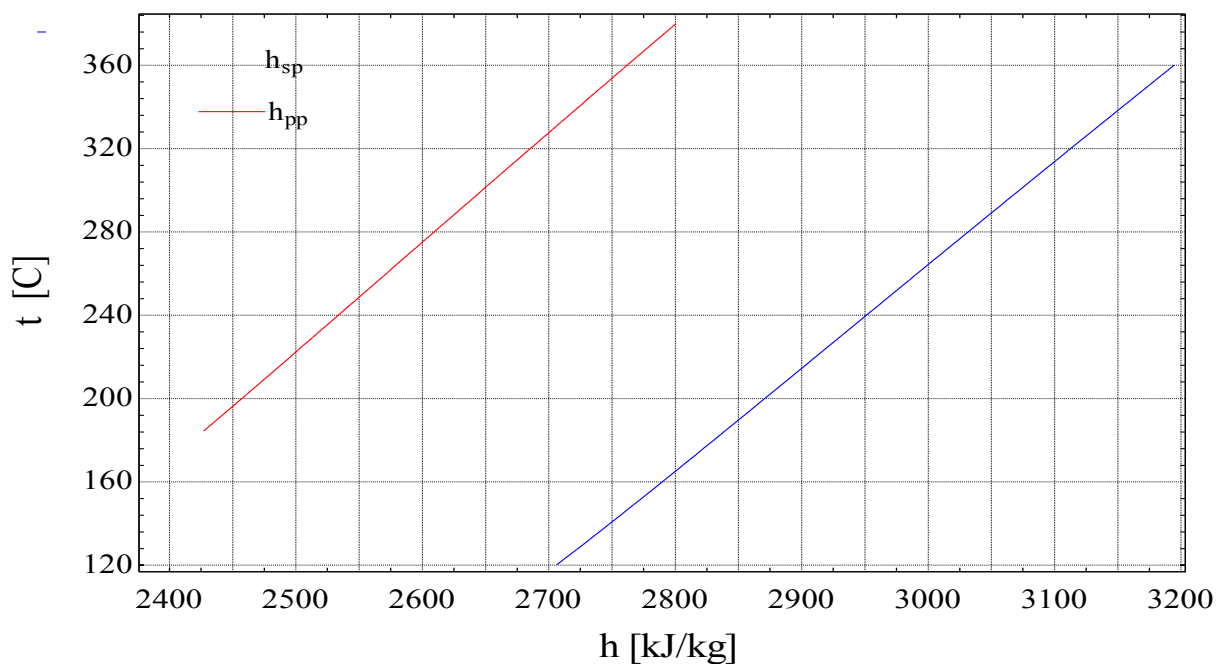
Entalpii pro sytou páru vyhledám stejně jak entalpii vodní páry u paroplynové směsi, akorát za tlak nedosazují parciální, ale celkový tlak syté páry  $p_{sp}$  a teplotu syté páry v daných bodech. Entalpii vstupní syté páry a přehřáté páry do srážecí jsme si vypočítali také při návrhu paroplynového cyklu, tak ji můžeme jen opsat.

$$h_{sp-1} = 2706 \quad [kJ/kg] \quad - \text{Entalpie syté páry v první sekci (saturační)}$$

$$h_{sp-101} = 3194 \quad [kJ/kg] \quad - \text{Entalpie přehřáté páry v poslední sekci}$$

$$h_{sp-i} \quad [kJ/kg] \quad - \text{Entalpie syté páry od 2 až 100 sekci}$$

Z vypočítaných hodnot vytvoříme graf (obr. 4.4) závislosti entalpie paroplynové směsi na teplotě a můžeme posoudit jak se bude měnit při ochlazování sytou parou, naopak entalpie syté páry se bude zvyšovat.



Obr. 4.4 Průběh zvyšování entalpie syté páry a snižování entalpie paroplynové směsi s měnění se teplotou ve srážeci přehřátí

#### 4.1.4 Tepelná vodivost paroplynové směsi a syté páry

Tepelnou vodivost u syté páry si můžeme najít v termodynamických tabulkách nebo použít program EES, ale u paroplynové směsi je výpočet složitější. Začneme s výpočtem u paroplynové směsi, nejprve spočítáme látkové množství.

Látkové množství obou složek u paroplynové směsi se ve srážeci přehřátí nemění, je u obou složek pořád stejné, stejně tak molární hmotnost a koncentrace:

$$n_{\text{CO}_2-1} = \frac{W_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}} \cdot 100 = n_{\text{CO}_2-101} = n_{\text{CO}_2-i} \quad (4.1.4.1)$$

$$n_{\text{CO}_2-1} = 0,3408 \quad [\text{mol}] \quad - \text{ Látkové množství oxidu uhličitého}$$

$$n_{\text{vp}-1} = \frac{W_{\text{vp}}}{M_{\text{vp}}} \cdot 100 = n_{\text{vp}-101} = n_{\text{vp}-i} \quad (4.1.4.2)$$

$$n_{\text{vp}-1} = 4,718 \quad [\text{mol}] \quad - \text{ Látkové množství vodní páry}$$

$$n_{c-1} = n_{co2-1} + n_{vp-1} = n_{c-101} = n_{c-i} \quad (4.1.4.3)$$

$$n_{c-1} = 5,059 \quad [\text{mol}] \quad - \text{Celkové látkové množství paroplynové směsi}$$

Látkové množství ve srážeci přehřátí jsme si spočítali a nyní můžeme vypočítat molární podíl dané látky v paroplynové směsi, který se také ve srážeci přehřátí nemění.

Molární podíl dané látky:

$$Y_{CO2-1} = \frac{n_{CO2-1}}{n_{C-1}} = Y_{CO2-101} = Y_{CO2-i} \quad (2.1.4.4)$$

$$Y_{CO2-1} = 0,06737 \quad [-] \quad - \text{Molární podíl oxidu uhličitého}$$

$$Y_{vp-1} = \frac{n_{vp-1}}{n_{C-1}} = Y_{vp-101} = Y_{vp-i} \quad (2.1.4.5)$$

$$Y_{vp-1} = 0,9326 \quad [-] \quad - \text{Molární podíl vodní páry}$$

Pro kontrolu spočítám, jestli součet molárního podílu vodní páry a oxidu uhličitého v paroplynové směsi udává výsledek 1.

$$Y_c = Y_{CO2-1} + Y_{vp-1} \quad (2.1.4.6)$$

$$Y_c = 1 \quad [-] \quad - \text{Celkový molární podíl obou složek musí vycházet 1.}$$

Další s kroků pro výpočet tepelné vodivosti směsi je nalézt tepelnou vodivost vodní páry a oxidu uhličitého třeba v programu EES pomocí teploty a parciálního tlaku

$$\lambda_{vp-1} = \text{Conductivity}(\text{Steam\_IAPWS}; T = t_{vp-1}; P = P_{vp})$$

$$\lambda_{vp-1} = 0,05269 \quad [\text{W/m.K}] \quad - \text{Tepelná vodivost vodní páry v první sekci}$$

$$\text{Conductivity} \quad - \text{Tepelná vodivost}$$

$$\lambda_{co2-1} = \text{Conductivity}(\text{CarbonDioxide}; T = t_{co2-1}; P = p_{co2})$$

$\lambda_{\text{co2-1}} = 0,04571$  [w/m.K] - Tepelná vodivost oxidu uhličitého  
v první sekci

Conductivity - Tepelná vodivost

$\lambda_{\text{vp-101}} = \text{Conductivity}(\text{Steam\_IAPWS}; T = t_{\text{vp-101}}; P = P_{\text{vp}})$

$\lambda_{\text{vp-101}} = 0,03189$  [w/m.K] - Tepelná vodivost vodní páry  
v poslední sekci

$\lambda_{\text{co2-101}} = \text{Conductivity}(\text{CarbonDioxide}; T = t_{\text{co2-101}}; P = p_{\text{co2}})$

$\lambda_{\text{co2-101}} = 0,02853$  [w/m.K] - Tepelná vodivost oxidu uhličitého  
v poslední sekci

$\lambda_{\text{vp-i}} = \text{Conductivity}(\text{Steam\_IAPWS}; T = t_{\text{vp-i}}; P = P_{\text{vp}})$

$\lambda_{\text{vp-i}}$  [w/m.K] - Tepelná vodivost vodní páry od  
2 až do 100 sekce

$\lambda_{\text{co2-i}} = \text{Conductivity}(\text{CarbonDioxide}; T = t_{\text{co2-i}}; P = p_{\text{co2}})$

$\lambda_{\text{co2-i}}$  [w/m.K] - Tepelná vodivost oxidu uhličitého od  
2 až do 100 sekce

Nyní dosadíme do vztahu 2.1.4 a vypočítáme vstupní tepelnou vodivost paroplynové směsi do srážeče přehřátí a výstupní tepelnou vodivost a také v jednotlivých sekcích.

$$\lambda_{\text{sm-1}} = \frac{y_{\text{CO2}} \cdot \lambda_{\text{CO2-1}} \cdot M_{\text{CO2}}^{1/3} + y_{\text{vp}} \cdot \lambda_{\text{vp-1}} \cdot M_{\text{vp}}^{1/3}}{y_{\text{CO2}} \cdot M_{\text{CO2}}^{1/3} + y_{\text{vp}} \cdot M_{\text{vp}}^{1/3}} \quad (2.1.4.4)$$

$\lambda_{\text{sm-1}} = 0,05208$  [w/m.K] - Tepelná vodivost paroplynové směsi  
v první sekci

$$\lambda_{\text{sm-101}} = \frac{y_{\text{CO2}} \cdot \lambda_{\text{CO2-101}} \cdot M_{\text{CO2}}^{1/3} + y_{\text{vp}} \cdot \lambda_{\text{vp-101}} \cdot M_{\text{vp}}^{1/3}}{y_{\text{CO2}} \cdot M_{\text{CO2}}^{1/3} + y_{\text{vp}} \cdot M_{\text{vp}}^{1/3}} \quad (2.1.4.4)$$



$\lambda_{sm-101} = 0,03160$  [w/m.K] - Tepelná vodivost paroplynové směsi  
v poslední sekci

$$\lambda_{sm-i} = \frac{y_{CO2} \cdot \lambda_{CO2-i} \cdot M_{CO2}^{1/3} + y_{vp} \cdot \lambda_{vp-i} \cdot M_{vp}^{1/3}}{y_{CO2} \cdot M_{CO2}^{1/3} + y_{vp} \cdot M_{vp}^{1/3}} \quad (2.1.4.4)$$

$\lambda_{sm-i}$  [w/m.K] - Tepelná vodivost paroplynové směsi  
od 2 až po 100 sekci

Musíme ještě vypočítat tepelnou vodivost syté páry, tu si vyhledáme analogicky, jako tepelnou vodivost u vodní páry v paroplynové směsi z výsledku vytvoříme graf (obr. 4.5).

$$\lambda_{sp-1} = \text{Conductivity}(\text{Steam\_IAPWS}; T = t_{sp-1}; P = P_{sp})$$

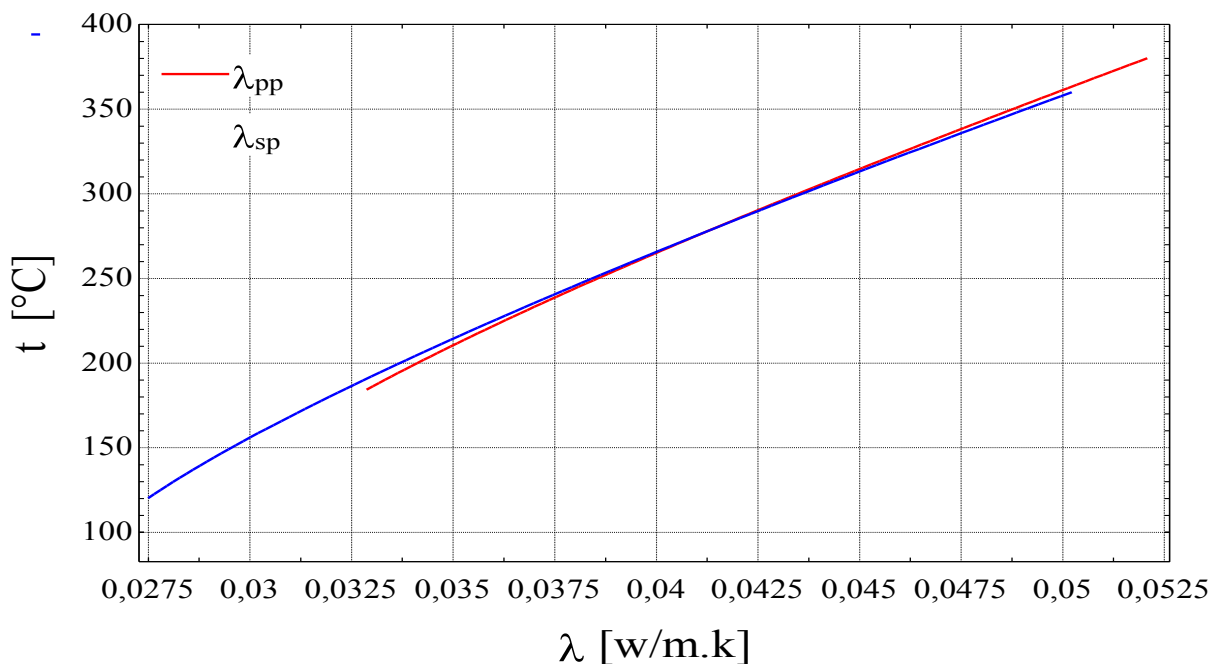
$\lambda_{sp-1} = 0,02749$  [w/m.K] - Tepelná vodivost syté páry v první sekci

$$\lambda_{sp-101} = \text{Conductivity}(\text{Steam\_IAPWS}; T = t_{sp-101}; P = P_{sp})$$

$\lambda_{sp-101} = 0,05022$  [w/m.K] - Tepelná vodivost syté páry v poslední sekci

$$\lambda_{sp-i} = \text{Conductivity}(\text{Steam\_IAPWS}; T = t_{sp-i}; P = P_{sp})$$

$\lambda_{sp-i}$  [w/m.K] - Tepelná vodivost syté páry od 2 až 100 sekci



Obr 4.5 Tepelná vodivost paroplynové směsi a syté páry ve srážeci přehřátí v závislosti na měnící se teplotě

#### 4.1.5 Výpočet dynamické viskozity paroplynové směsi a syté páry

Postupujeme stejně, jak v předchozí části 2.1.5 kde jsme si vypočítali dynamickou viskozitu obecně, nyní aplikujeme obecné vzorce v praxi ve srážeci přehřátí. Nejprve si vyhledáme dynamickou viskozitu vodní páry a oxidu uhličitého v první a poslední sekci výměníku, dále pak pro další sekce 2 až 100.

$$\eta_{vp-1} = \text{Viscosity}(\text{Steam\_IAPWS}; T = t_{vp-1}; P = P_{vp})$$

$$\eta_{vp-1} = 0,00002361 \quad [\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}] \quad - \text{Dynamická viskozita vodní páry v 1 sekci}$$

$$\eta_{co2-1} = \text{Viscosity}(\text{CarbonDioxide}; T = t_{co2-1}; P = p_{co2})$$

$$\eta_{co2-1} = 0,00002999 \quad [\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}] \quad - \text{Dynamická viskozita oxidu uhličitého v 1 sekci}$$

$$\eta_{vp-101} = \text{Viscosity}(\text{Steam\_IAPWS}; T = t_{vp-101}; P = P_{vp})$$

$$\eta_{vp-101} = 0,00001474 \quad [\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}] \quad - \text{Dynamická viskozita vodní páry ve 101 sekci}$$

$$\eta_{co2-101} = \text{Viscosity}(\text{CarbonDioxide}; T = t_{co2-101}; P = p_{co2})$$

$$\eta_{co2-101} = 0,00002147 \quad [\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}] \quad - \text{Dynamická viskozita oxidu uhličitého ve 101 sekci}$$

Zjistíme viskozitu i ve zbývajících sekcích:

$$\eta_{vp-i} = \text{Viscosity}(\text{Steam\_IAPWS}; T = t_{vp-i}; P = P_{vp})$$

$$\eta_{vp-i} \quad [\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}] \quad - \text{Dynamická viskozita vodní páry v 2 až 100 sekcí}$$

$$\eta_{co2-i} = \text{Viscosity}(\text{CarbonDioxide}; T = t_{co2-i}; P = p_{co2})$$

$$\eta_{co2-i} \quad [\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}] \quad - \text{Dynamická viskozita oxidu uhličitého v 2 až 100 sekcí}$$

Nyní spočítáme potřebné korelace k výpočtům dynamické viskozity:

$$\Phi_{co2-1} = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{\eta_{vp-1}}{\eta_{co2-1}} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{M_{co2}}{M_{vp}} \right)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left( 1 + \frac{M_{vp}}{M_{co2}} \right)^{1/2}} \quad (2.1.5.2)$$

$$\Phi_{co2-1} = 1,325 \quad [-] \quad - \text{Korelace pro oxid uhličitý v první sekci}$$

$$\Phi_{vp-1} = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{\eta_{co2-1}}{\eta_{vp-1}} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{M_{vp}}{M_{co2}} \right)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left( 1 + \frac{M_{co2}}{M_{vp}} \right)^{1/2}} \quad (2.1.5.3)$$

$$\Phi_{vp-1} = 0,6889 \quad [-] \quad - \text{Korelace pro vodní páru v první sekci}$$

Analogicky provedeme výpočet pro poslední sekci a pro všechny zbývající sekce a přistoupíme k dosazení do vzorce pro dynamickou viskozitu směsi.

$$\eta_{sm-1} = \frac{\eta_{vp-1}}{1 + \Phi_{co2-1} \cdot \frac{y_{co2}}{y_{vp}}} + \frac{\eta_{co2-1}}{1 + \Phi_{vp-1} \cdot \frac{y_{vp}}{y_{co2}}} \quad (2.1.5.1)$$

$$\eta_{sm-1} = 0,00002439 \quad [\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}] \quad - \text{Dynamická viskozita paroplynové směsi v první sekci}$$

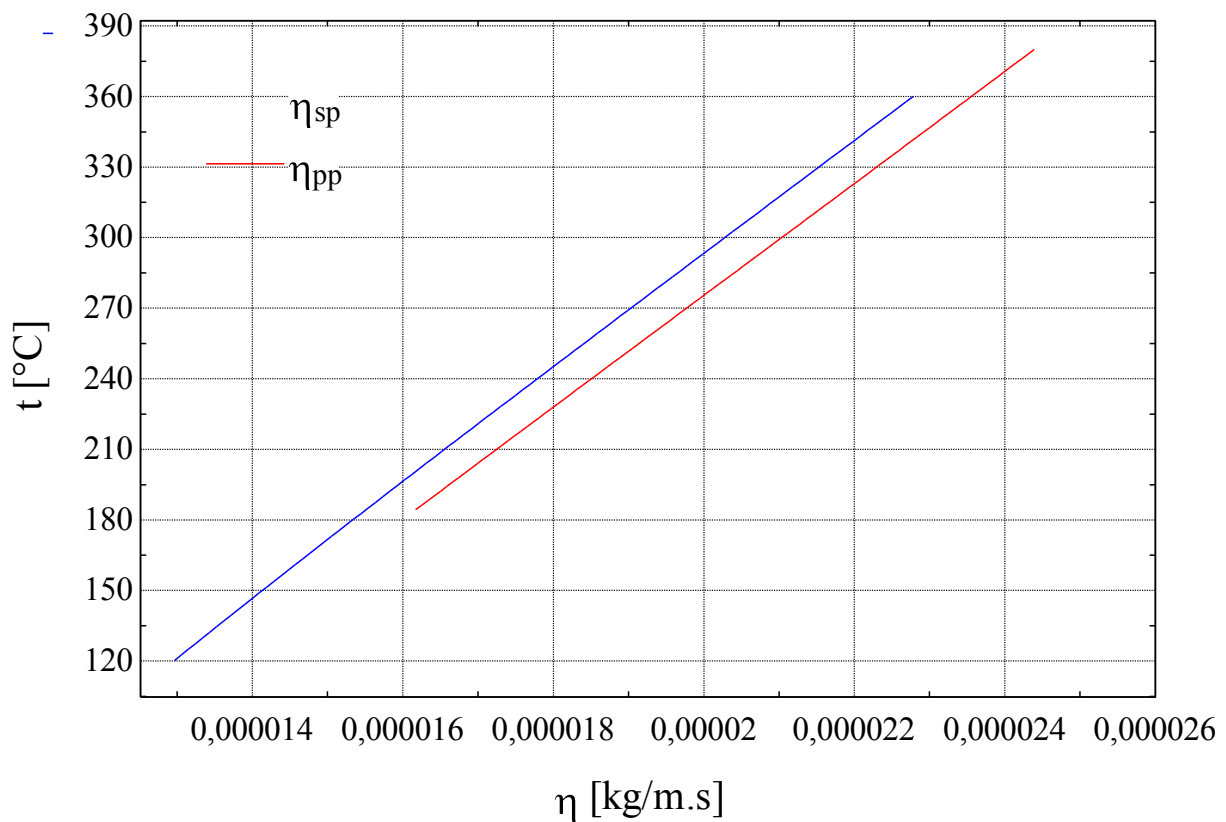
$$\eta_{sm-101} = \frac{\eta_{vp-101}}{1 + \Phi_{co2-101} \cdot \frac{y_{co2}}{y_{vp}}} + \frac{\eta_{co2-101}}{1 + \Phi_{vp-101} \cdot \frac{y_{vp}}{y_{co2}}} \quad (2.1.5.4)$$

$\eta_{sm-101} = 0,00001545 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$  - Dynamická viskozita paroplynové směsi  
v poslední sekci

$$\eta_{sm-i} = \frac{\eta_{vp-i}}{1 + \Phi_{co2-i} \cdot \frac{y_{co2}}{y_{vp}}} + \frac{\eta_{co2-i}}{1 + \Phi_{vp-i} \cdot \frac{y_{vp}}{y_{co2}}} \quad (2.1.5.4)$$

$\eta_{sm-i} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$  -Dynamická viskozita paroplynové směsi  
Ve zbývajících sekcích 2 až 100

Dynamickou viskozitu směsi ve srážeci přehřátí jsme si vypočítali a musíme jí najít také u syté páry, najdeme ji úplně stejně jako v předchozí části pro vodní páru v paroplynové směsi akorát podle celkového tlaku syté páry a dané teploty v jednotlivých sekcích.



Obr. 4.6 S nárůstem teploty dynamická viskozita paroplynové směsi a syté páry roste

#### 4.1.6 Kinematická viskozita paroplynové směsi a syté páry ve srážeci přehřátí

K výpočtu Reynoldsovo kritéria potřebujeme znát kinematickou viskozitu paroplynové směsi a syté páry, je to převrácená hodnota dynamické viskozity a hustoty, hustotu paroplynové směsi jsme si už vypočítali směsi stejně tak dynamickou viskozitu obou medií, tak můžeme jen dosadit.

$$\nu_{sm-l} = \frac{\eta_{sm-l}}{\rho_{sm-l}} \quad (2.1.6)$$

$$\nu_{sm-l} = 0,00001676 \quad [m^2.s^{-1}] \quad \text{-Kinematická viskozita paroplynové směsi}$$

v první sekci

$$\nu_{sm-l01} = \frac{\eta_{sm-l01}}{\rho_{sm-l01}} \quad (2.1.6)$$

$$\nu_{sm-l01} = 0,00000715 \quad [m^2.s^{-1}] \quad \text{-Kinematická viskozita paroplynové směsi}$$

v první sekci

$$\nu_{sm-i} = \frac{\eta_{sm-i}}{\rho_{sm-i}} \quad (2.1.6)$$

$$\nu_{sm-i} = 0,00000715 \quad [m^2.s^{-1}] \quad \text{-Kinematická viskozita paroplynové směsi}$$

v 2 až 100 sekci

Výpočet pro sytou páru:

$$\nu_{sp-l} = \frac{\eta_{sm-l}}{\rho_{sm-l}} \quad (2.1.6)$$

$$\nu_{sp-l} = 0,00001148 \quad [m^2.s^{-1}] \quad \text{-Kinematická viskozita paroplynové směsi}$$

v první sekci

$$\nu_{sp-l01} = \frac{\eta_{sm-l01}}{\rho_{sm-l01}} \quad (2.1.6)$$

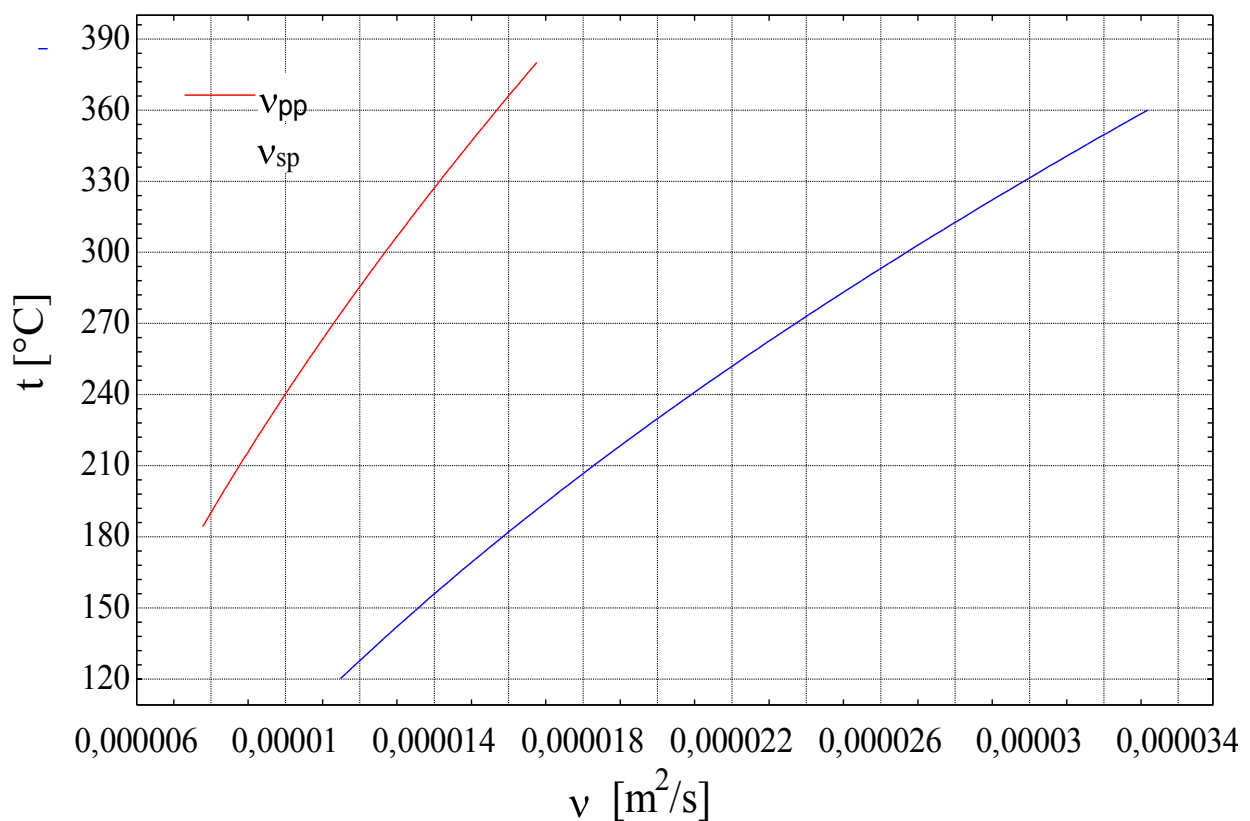
$$\nu_{sp-l01} = 0,00003318 \quad [m^2.s^{-1}] \quad \text{-Kinematická viskozita paroplynové směsi}$$

v poslední sekci

$$v_{sp-i} = \frac{\eta_{sm-i}}{\rho_{sm-i}} \quad (2.1.6)$$

$v_{sp-i}$   $[m^2 \cdot s^{-1}]$  -Kinematická viskozita paroplynové směsi  
v 2 až 100 sekci

Z vypočítaných hodnot kinematické viskozity v každé sekci výměníku vytvoříme graf, veškerá veličiny obsažené v téhle části můžeme najít v části, kde jsem vysvětloval obecné výpočty pro paroplynovou směs a je tam také popsán jejich význam. Veškeré vypočítané hodnoty naleznete v příloze, kde jsou zapsány ve formě tabulky. Pro výpočet termodynamických vlastností jsem použil program EES profesionál ve kterém jsem vytvářel grafy z mých výpočtů a tento soubor patří k diplomové práci.



Obr. 4.7 Průběh kinematické viskozity paroplynové směsi ve srážeci přehřátí a syté páry  
v závislosti na měnící se teplotu

## 4.2 Výpočet sdílení tepla pro návrh srážecí přehrátky

Pro výpočet bezrozměrných kritérií a přestupu tepla pro srážecí přehrátku budeme vycházet z předešlých výpočtů termodynamických vlastností paroplynové směsi a syté páry. Pro tento úkol budu vycházet z tepelných výpočtů parních kotlů ON 07 0417, výpočet tepelných výměníků při podélném obtékání.

### 4.2.1 Výpočet množství trubek v trubkovnici [2] [3]

Vypočítáme si vstupní průřez potrubí paroplynové směsi do srážecí přehrátky, zvolíme si průměr trubek dle EN 10216 – 2 normy pro objednání trubek, následně si spočítáme množství trubek tak, že vydělíme průřez vstupního potrubí s průřezem zvolených trubek a vyjde nám výsledný počet trubek v trubkovnici.

$$S_{\text{vs-trub.}} = \frac{\dot{m}_{\text{sm}}}{\rho_{\text{sm-l}} \cdot v_{\text{sm}}} \quad (4.2.1.1)$$

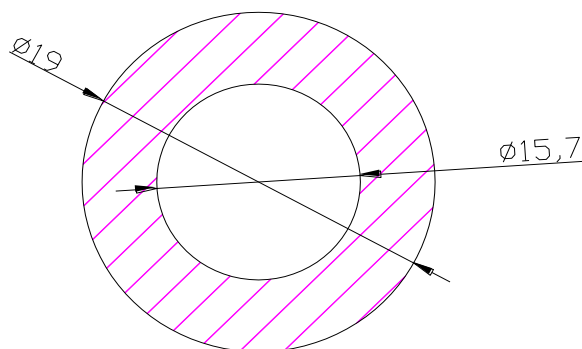
$S_{\text{vs-trub.}} = 1,783$	$[\text{m}^2]$	- Průřez vstupního potrubí do srážecí přehrátky
$v_{\text{sm-l}} = 21,4$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	- Zvolená přiměřená rychlost paroplynové směs vstupní
$\rho_{\text{sm-l}} = 1,456$	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	- Vstupní hustota paroplynové směsi
$\dot{m}_{\text{sm}} = 55,56$	$[\text{kg}/\text{s}]$	- Hmotnostní průtok paroplynové směsi

Rychlost jsme volili vzhledem k přiměřeným velikostem vstupního potrubí do srážecí přehrátky, jak vidíme v (tab. 4-1) průměr potrubí klesá se zvyšující rychlostí paroplynové směsi. V předchozí části jsem vypočítal hustotu paroplynové směsi ve srážecí přehrátky, která roste se snižující teplotou, z toho víme, že výstupní rychlost bude menší než vstupní. Průřez trubek se ve srážecí přehrátky nemění, tak si vypočítáme zbývající rychlosti podle vzorce 4.2.1 až po 101 sekci výměníku.

Hustota směsi [kg/m <sup>3</sup> ]	rychlost průtoku [m/s]	hmotnostní průtok [kg/s]	Průměr [m]
1,456	10	55,55	2,204583313
1,456	13	55,55	1,933547474
1,456	16	55,55	1,74287614
1,456	19	55,55	1,599372835
1,456	22	55,55	1,486329766
1,456	25	55,55	1,394300912
1,456	28	55,55	1,317490524
1,456	31	55,55	1,252119182
1,456	34	55,55	1,195603168
1,456	37	55,55	1,14610829
1,456	40	55,55	1,102291656
1,456	43	55,55	1,063144478
1,456	46	55,55	1,02789227
1,456	49	55,55	0,995929223
1,456	52	55,55	0,966773737
1,456	55	55,55	0,940037483
1,456	58	55,55	0,915403395

Tab. 4-1 Vypočítaných průměrů potrubí závislá na rychlosti toku paroplynové směsi

Velikost trubek pro trubkovnici 19 x 1,65



Obr. 4.8 Profil průřezu trubek pro trubkovnici

$d_{\text{trb}} = 0,019$  [m] - Vnější průměr trubek pro trubkovnici

$d_{\text{trb-v}} = 0,0157$  [m] - Vnitřní průměr trubek pro trubkovnici

$$S_{\text{trb-v}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{trb-v}}^2}{4} \quad (4.2.1.2)$$

$S_{\text{trb-v}} = 0,0001935$  [m<sup>2</sup>] - Vnitřní průřez trubek pro trubkovnici

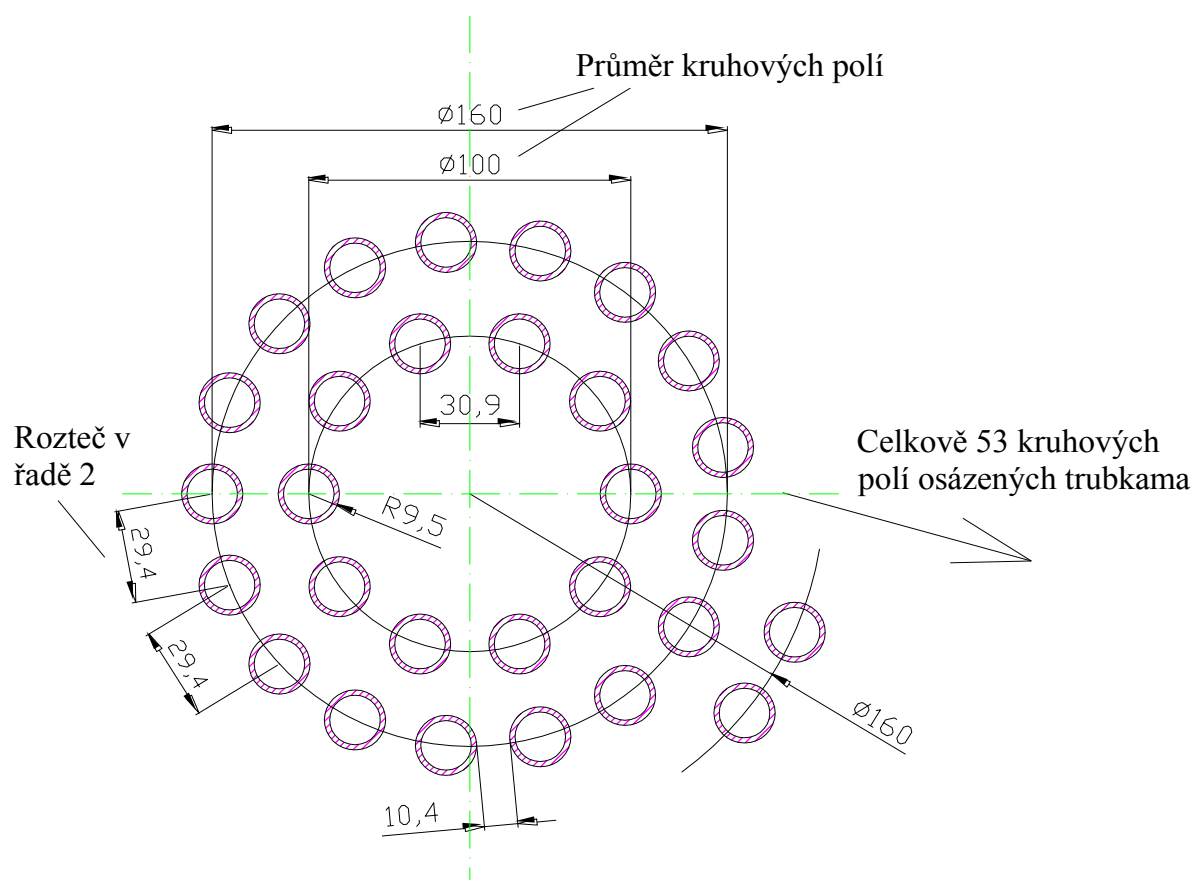


Nyní spočítáme počet všech trubek, vstupním potrubím do srážeče přehřátí protéká 55,56 [kg/s] paroplynové směsi o rychlosti 21,4 [m/s], stejnou rychlost má směs i v první části trubkovnice tedy celkový součet vnitřních průřezů všech trubek se musí rovnat průřezu vstupního potrubí, proto vydělíme vnitřní průřez vstupního potrubí s vnitřním průřezem trubky pro trubkovnici a výsledkem dostaneme množství všech trubek.

$$K_{s_{tb}} = \frac{S_{vs-tb}}{S_{tb-v}} \quad (4.2.1.3)$$

$K_{s_{tb}} = 9214$  [ks] - Počet trubek v trubkovnici ve srážeci přehřátí

Zvolíme si uspořádání trubek v trubkovnici jako je rozteč mezi jednotlivými trubkami, dále také vzdálenost jednotlivých kruhových polí od sebe, tak abychom soustředně uspořádali 9214 trubek. Výpočet a rozmístění jednotlivých trubek provedu v programu Excel.



Obr. 4.9 Řazení jednotlivých trubek v jednotlivých kruhových polích

První kruhové pole začíná na průměru  $D_{kp} = 100$  mm a každé další kruhové pole je větší o 60 mm v průměru až po 53 pole. Abych mohl zakótovat výrobní rozměry osázení jednotlivých trubek, musím vypočítat obvod jednotlivých kruhových polí.

Výpočet množství trubek v jednotlivých kruhových polích:

$s_{trb-přibližná} = 30$  [mm] - Zvolená rozteč kladení trubek

$O_{kr-i}$  - Obvod kruhového pole

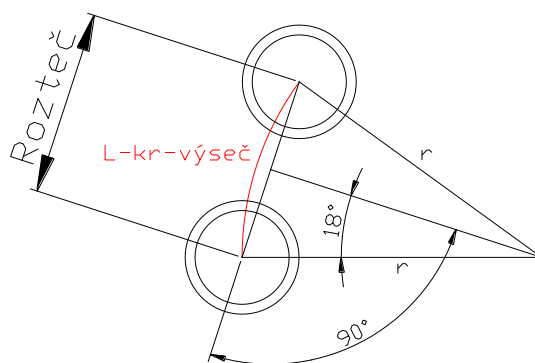
$$K_{s_{trb-kp,i}} = O_{kr-i} / s_{trb-přibližná} \quad (4.2.1.4)$$

$K_{s_{trb-kp,i}}$  [-] - Počet trubek v jednotlivých řadách

$\sim$  [-] - Zaokrouhlíme počet trubek nahoru  
nebo dolů aby nám vyšel celkový počet  
trubek 9214

$$L_{kr-výseč,i} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{360} \cdot \alpha = \frac{O_{kr-i}}{K_{s_{trb-kp,i}}} \quad (4.2.1.5)$$

$L_{kr-výseč,i}$  [mm] - Délka kruhové výseče v kruhových polích



Obr. 4.10 Geometrie osázení trubek

$$s_{trb,i} = (\sin \alpha_i \cdot r_i) \cdot 2 \quad (4.2.1.6)$$

$s_{trb,i}$  [mm] - Skutečná rozteč kladení trubek v  
kruhových polích

Výpočty musíme opakovat, dokud nedosáhneme celkového součtu počtů trubek v trubkovnici a výsledné hodnoty zapíšeme do (tab. 4-2), množství trubek a geometrii máme, ale neznáme délku trubek, proto budou následovat výpočty přestupů tepla a výsledkem bude celková délka srážeče přehřátí.

Kruhové pole	D <sub>kp-i</sub> [mm]	D <sub>kp-i</sub> [m]	O <sub>kr-i</sub> [mm]	O <sub>kr-i</sub> [m]	S <sub>kr-i</sub> [mm <sup>2</sup> ]	S <sub>kr-i</sub> [m <sup>2</sup> ]	K <sub>S<sub>trb</sub>-kp-i</sub>	~	L <sub>kr-výseč,i</sub> [mm]	S <sub>trb</sub> [mm]
1	100	0,1	314	0,314	7850	0,00785	10,46666667	10	31,4	30,90169944
2	160	0,16	502,4	0,5024	20096	0,020096	16,74666667	17	29,55294118	29,39992285
3	220	0,22	690,8	0,6908	37994	0,037994	23,02666667	23	30,03478261	29,9566628
4	280	0,28	879,2	0,8792	61544	0,061544	29,30666667	29	30,31724138	30,27332516
5	340	0,34	1067,6	1,0676	90746	0,090746	35,58666667	36	29,65555556	29,63295253
6	400	0,4	1256	1,256	125600	0,1256	41,86666667	42	29,9047619	29,89203743
7	460	0,46	1444,4	1,4444	166106	0,166106	48,14666667	49	29,47755102	29,47230119
8	520	0,52	1632,8	1,6328	212264	0,212264	54,42666667	54	30,23703704	30,23531103
9	580	0,58	1821,2	1,8212	264074	0,264074	60,70666667	61	29,8557377	29,85767777
10	640	0,64	2009,6	2,0096	321536	0,321536	66,98666667	67	29,99402985	29,99824798
11	700	0,7	2198	2,198	384650	0,38465	73,26666667	73	30,10958904	30,1155631
12	760	0,76	2386,4	2,3864	453416	0,453416	79,54666667	80	29,83	29,83745998
13	820	0,82	2574,8	2,5748	527834	0,527834	85,82666667	86	29,93953488	29,94805891
14	880	0,88	2763,2	2,7632	607904	0,607904	92,10666667	92	30,03478261	30,04417696
15	940	0,94	2951,6	2,9516	693626	0,693626	98,38666667	99	29,81414141	29,82425749
16	1000	1	3140	3,14	785000	0,785	104,6666667	105	29,9047619	29,91546617
17	1060	1,06	3328,4	3,3284	882026	0,882026	110,9466667	111	29,98558559	29,99678957
18	1120	1,12	3516,8	3,5168	984704	0,984704	117,2266667	117	30,05811966	30,06975195
19	1180	1,18	3705,2	3,7052	1E+06	1,093034	123,5066667	124	29,88064516	29,89260289
20	1240	1,24	3893,6	3,8936	1E+06	1,207016	129,7866667	130	29,95076923	29,96304409
21	1300	1,3	4082	4,082	1E+06	1,32665	136,0666667	136	30,01470588	30,02725915
22	1360	1,36	4270,4	4,2704	1E+06	1,451936	142,3466667	142	30,07323944	30,08603853
23	1420	1,42	4458,8	4,4588	2E+06	1,582874	148,6266667	149	29,92483221	29,93779223
24	1480	1,48	4647,2	4,6472	2E+06	1,719464	154,9066667	155	29,98193548	29,99508897
25	1540	1,54	4835,6	4,8356	2E+06	1,861706	161,1866667	161	30,03478261	30,04810976
26	1600	1,6	5024	5,024	2E+06	2,0096	167,4666667	168	29,9047619	29,91818629
27	1660	1,66	5212,4	5,2124	2E+06	2,163146	173,7466667	174	29,95632184	29,96988776
28	1720	1,72	5400,8	5,4008	2E+06	2,322344	180,0266667	180	30,00444444	30,01813907
29	1780	1,78	5589,2	5,5892	2E+06	2,487194	186,3066667	186	30,04946237	30,06327442
30	1840	1,84	5777,6	5,7776	3E+06	2,657696	192,5866667	193	29,9357513	29,94961251
31	1900	1,9	5966	5,966	3E+06	2,83385	198,8666667	199	29,9798995	29,99385983
32	1960	1,96	6154,4	6,1544	3E+06	3,015656	205,1466667	205	30,02146341	30,03551506
33	2020	2,02	6342,8	6,3428	3E+06	3,203114	211,4266667	212	29,91886792	29,93294765
34	2080	2,08	6531,2	6,5312	3E+06	3,396224	217,7066667	218	29,95963303	29,97379149
35	2140	2,14	6719,6	6,7196	4E+06	3,594986	223,9866667	224	29,99821429	30,01244589
36	2200	2,2	6908	6,908	4E+06	3,7994	230,2666667	230	30,03478261	30,04908229
37	2260	2,26	7096,4	7,0964	4E+06	4,009466	236,5466667	237	29,94261603	29,95692604
38	2320	2,32	7284,8	7,2848	4E+06	4,225184	242,8266667	243	29,97860082	29,99297087
39	2380	2,38	7473,2	7,4732	4E+06	4,446554	249,1066667	249	30,01285141	30,0272777
40	2440	2,44	7661,6	7,6616	5E+06	4,673576	255,3866667	255	30,0454902	30,05996927
41	2500	2,5	7850	7,85	5E+06	4,90625	261,6666667	262	29,96183206	29,9763108
42	2560	2,56	8038,4	8,0384	5E+06	5,144576	267,9466667	268	29,99402985	30,00855598
43	2620	2,62	8226,8	8,2268	5E+06	5,388554	274,2266667	274	30,02481752	30,03938836
44	2680	2,68	8415,2	8,4152	6E+06	5,638184	280,5066667	281	29,94733096	29,9618965
45	2740	2,74	8603,6	8,6036	6E+06	5,893466	286,7866667	287	29,97770035	29,99230651
46	2800	2,8	8792	8,792	6E+06	6,1544	293,0666667	293	30,00682594	30,02147059
47	2860	2,86	8980,4	8,9804	6E+06	6,420986	299,3466667	299	30,03478261	30,04946378
48	2920	2,92	9168,8	9,1688	7E+06	6,693224	305,6266667	306	29,96339869	29,97806992
49	2980	2,98	9357,2	9,3572	7E+06	6,971114	311,9066667	312	29,99102564	30,00573048
50	3040	3,04	9545,6	9,5456	7E+06	7,254656	318,1866667	318	30,01761006	30,0323469
51	3100	3,1	9734	9,734	8E+06	7,54385	324,4666667	325	29,95076923	29,96549403
52	3160	3,16	9922,4	9,9224	8E+06	7,838696	330,7466667	331	29,97703927	29,99179377
53	3220	3,22	10111	10,111	8E+06	8,139194	337,0266667	337	30,00237389	30,01715675
Součet							9208,573333	9214		

Tab. 4-2 Rozměry sázení jednotlivých trubek v kruhových polích

Musíme zjistit velikost Reynoldsova kritéria na straně paroplynové směsi a syté páry abychom zjistili, jestli ve srážeci přehřátí převládá laminární, přechodové nebo turbulentní proudění. Musíme vycházet ze středních hodnot, sečteme naše vypočítané hodnoty a vydělíme počtem hodnot.

Reynoldsovo kritérium pro paroplynovou směs:

$$v_{\text{str-pp}} = \text{SUM}(v[1..101])/101$$

$$v_{\text{str-pp}} = 17,91 \quad [\text{m/s}] \quad - \text{ Výpočet střední hodnoty rychlosti paroplynové směsi}$$

$$t_{\text{str-sp}} = \text{SUM}(t_{\text{sp}}[1..101])/101$$

$$t_{\text{str-pp}} = 240,1 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad - \text{ Střední teplota syté páry}$$

$$t_{\text{str-pp}} = \text{SUM}(t_{\text{vp}}[1..101])/101$$

$$t_{\text{str-pp}} = 273,5 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad - \text{ Střední teplota paroplynové směsi}$$

V tabulce vypočítaných termodynamických hodnot paroplynové směsi střední teplotě odpovídá 51 sekce ve výměníku, to znamená, že potřebné střední hodnoty jako je např. dynamická viskozita odpovídá hodnota dynamické viskozity v 51 sekci a dalším.

$$v_{\text{sm-str}} = 0,00001145 \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad - \text{ Střední kinematická viskozita v 51 sekci}$$

$$\text{Re}_{\text{pp-str}} = \frac{v_{\text{pp-str}} \cdot d_{\text{trb-v}}}{v_{\text{sm-str}}} \quad (4.2.1.7)$$

$$\text{Re}_{\text{pp-str}} = 24561 \quad [-] \quad - \text{ Střední Reynoldsovo kritérium pro paroplynovou směs}$$

Střední velikost Reynoldsova kritéria pro paroplynovou směs nám říká, že se jedná o proudění turbulentní.

Prandtlovo kritérium pro paroplynovou směs:

Pro výpočet Prandtlova kritéria potřebujeme znát tepelnou kapacitu  $cp_{pp-str}$ , střední teplotu známe a parciální tlaky také, tak využijeme program EES a vyhledáme si pro vodní páru a oxid uhličitý.

$$cp_{vp-str} = Cp(Steam\_IAPWS; T = t_{vp-str}; P = P_{vp})$$

$$cp_{vp-str} \quad [kJ/kg.K] \quad - \text{Střední měrná tepelná kapacita vodní páry}$$

$$cp_{co2-str} = Cp(CarbonDioxide; T=t_{co2-str}; P = P_{co2})$$

$$cp_{co2-str} \quad [kJ/kg.K] \quad - \text{Střední měrná kapacita oxidu uhličitého}$$

Nyní spočítáme celkovou střední měrnou kapacitu paroplynové směsi s pomocí hmotnostních koncentrací  $w_{vp}$  a  $w_{co2}$ :

$$cp_{pp-str} = cp_{vp-str} \cdot w_{vp} + cp_{co2-str} \cdot w_{co2} \quad (4.2.1.8)$$

$$cp_{pp-str} = 1,914 \quad [kJ/kg.K] \quad - \text{Střední měrná kapacita paroplynové směsi}$$

Dále si najdu tepelnou vodivost paroplynové směsi a dynamické viskozity při střední teplotě odpovídající 51 sekci výměníku. V některých vzorcích uvádím index sm jako směs, ale jedná se o paroplynovou směs pp.

$$\lambda_{pp-str} = 0,04115 \quad [W/m.K] \quad - \text{Střední tepelná vodivost paroplynové směsi}$$

$$\eta_{pp-str} = 0,00001992 \quad [kg.m^{-1}.s^{-1}] \quad - \text{Střední dynamická viskozita paroplynové směsi}$$

Následně můžeme dosadit:

$$Pr_{pp-str} = \frac{\eta_{pp-str} \cdot cp_{pp-str}}{\lambda_{pp-str}} \quad (4.2.1.9)$$

$$\text{Pr}_{\text{pp-str}} = 0,9252 \quad [-] \quad - \text{Střední prandtlovo kritérium pro Paroplynovou směs}$$

Sdílení tepla probíhá konvekcí, tak si musím Nusseltovo kritérium pro přestup tepla v kruhovém kanálu při turbulentním proudění. V odborné literatuře pro výměníky tepla jsem si našel vzorec pro Nusseltovo kritérium pro naše podmínky kdy  $\text{Re} > 10^4$  a Prandtlovo kritérium je  $0,6 < \text{Pr} < 200$ .

Pro neizotermické proudění je nutno tyto vztahy upravit součinitelem  $\varepsilon_t$  upravující vliv teploty, pro  $1 < T_s/T_0 < 3,5$  platí:

$$\varepsilon_t = \left( \frac{T_s}{T_0} \right)^{-0,55} \quad (4.2.1.10)$$

$$\varepsilon_t = 0,6945 \quad [-] \quad - \text{Součinitel upravující teplotu}$$

$$T_s = 0,5 \cdot (t_{\text{str-pp}} + t_{\text{str-sp}}) + 273,15 \quad (4.2.1.11)$$

$$T_s = 530 \quad [\text{K}] \quad - \text{Odhad teploty stěny v kelvinech}$$

$$T_0 = 273,15 \quad [\text{K}] \quad - \text{Termodynamická teplota při } t = 0 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

Opravný součinitel  $\varepsilon_L$  se zavádí, jestliže se jedná o krátké trubky delky většinou menší než  $50 \cdot d_{\text{ub}}$  v našem případě je  $\varepsilon_t = 1$  a opravný součinitel  $\varepsilon_R$  se zavádí přibližně 1,2 podle normy, protože paroplynová směs proudí směrem nahoru, pak v oblouku změni směr a proudí dolů.

$$\text{Nu}_{\text{pp-str}} = \frac{0,023 \cdot \text{Pr}_{\text{pp-str}}^{0,4} \cdot \text{Re}_{\text{pp-str}}^{0,8}}{1 + 2,14 \cdot \left( \frac{2}{\text{Pr}_{\text{pp-str}}^3} - 1 \right) \cdot \text{Re}_{\text{pp-str}}^{-0,1}} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_L \cdot \varepsilon_R \quad (4.2.1.12)$$

$$\text{Nu}_{\text{pp-str}} = 62,91 \quad [-] \quad - \text{Střední Nusseltovo kritérium pro paroplynovou směs při turbulentním proudění v kruhovém kanálu}$$

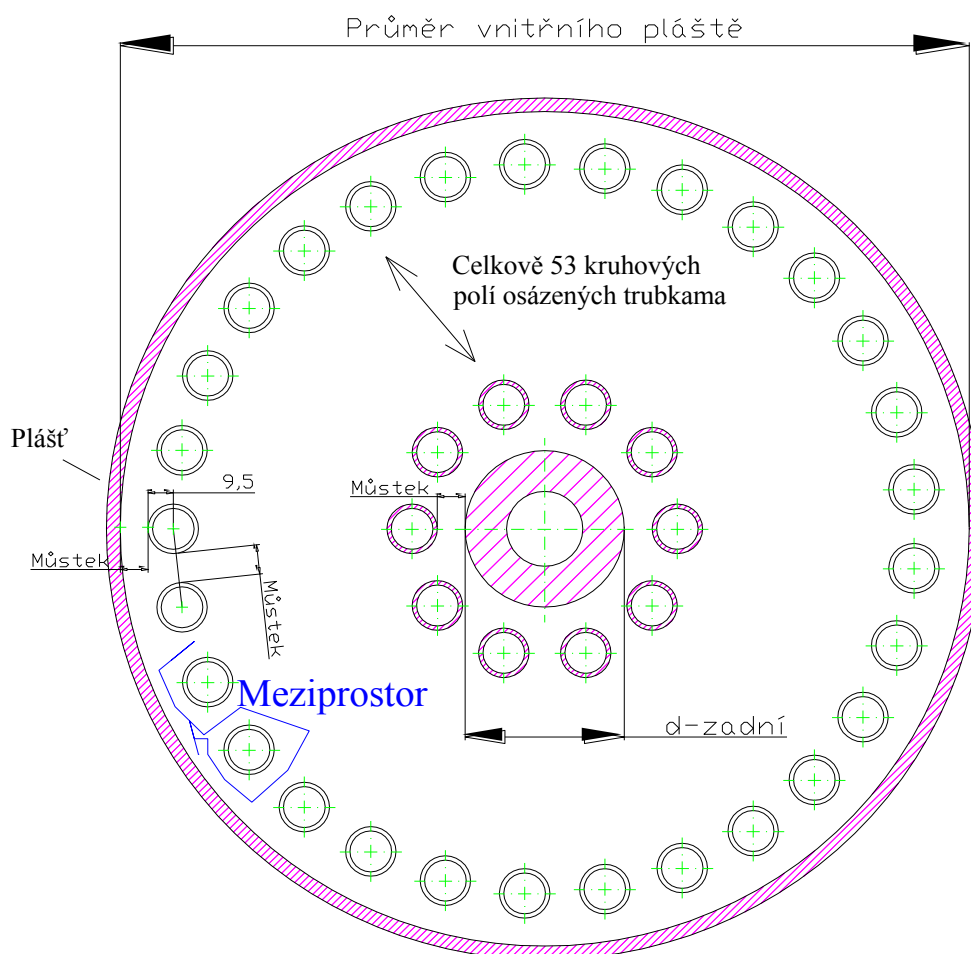
$$\alpha_{pp-str} = \frac{Nu_{pp-str} \cdot \lambda_{pp-str}}{d_{trb-v}} \quad (4.2.1.13)$$

$$\alpha_{pp-str} = 163,6 \quad [w/m^2.K]$$

- Střední součinitel přestupu tepla

Pro paroplynovou směs

Všechny výpočty musíme zopakovat i na straně syté páry, ale nejprve si musíme stanovit geometrii meziprostoru trubkovnice kde proudí sytá pára.



Obr. 4.11 Geometrie meziprostoru kde proudí sytá pára

$$d_{53} = 3,220 \quad [m]$$

- Poslední průměr kruhového pole

$$d_1 = 0,1 \quad [m]$$

- První průměr kruhového pole

$$s_{trb} = 0,03 \quad [m]$$

- Rozteč

$$d_{trb} = 0,019 \quad [m]$$

- Vnější průměr trubky

Vypočítám si můstek na (obr. 4.11) mezi jednotlivými trubkami:

$$s_{\text{mstek}} = s_{\text{trb}} - d_{\text{trb}}$$

$$s_{\text{mstek}} = 0,011 \quad [\text{m}] \quad - \text{Můstek mezi trubkami v trubkovnici}$$

$$d_{\text{pred}} = d_{53} + (s_{\text{mstek}} + d_{\text{trb}} / 2) \cdot 2 \quad (4.2.1.14)$$

$$d_{\text{pred}} = 3,261 \quad [\text{m}] \quad - \text{Vnitřní průměr pláště}$$

$$d_{\text{zad}} = d_1 - (s_{\text{mstek}} + d_{\text{trb}} / 2) \cdot 2$$

$$d_{\text{zad}} = 0,059 \quad [\text{m}] \quad - \text{Zadní průměr stavěcí trubky}$$

Potřebuji si spočítat vnitřní průřez pláště a průřez stavěcí trubky, jejich rozdíl je celkový vnitřní prostor bez veškerých trubek.

$$S_{\text{trubkov}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{pred}}^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_{\text{zad}}^2}{4} \quad (4.2.1.15)$$

$$S_{\text{trubkov}} = 8,345 \quad [\text{m}^2] \quad - \text{Vnitřní průřez trubkovnice}$$

Spočítám celkový součet průřezu trubek v trubkovnici a odečtu ho od průřezu trubkovnice a dostanu výsledný průřez meziprostoru, kde proudí sytá pára.

$$S_{\text{trb-v sech}} = \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{trb}}^2}{4} \right) \cdot K s_{\text{trb}} \quad (4.2.1.16)$$

$$S_{\text{trb-v sech}} = 2,611 \quad [\text{m}^2] \quad - \text{Součtový průřez trubek v trubkovnici}$$

$$S_{\text{mezi.}} = S_{\text{trubkov}} - S_{\text{trb-v sech}} \quad (4.2.1.17)$$

$$S_{\text{mezi.}} = 5,734 \quad [\text{m}^2] \quad - \text{Meziprostor kde proudí sytá pára}$$

Známe meziprostor, kde proudí sytá pára, tak si spočítám, jak velkou rychlostí proudí, jestliže znám její hmotnostní průtok a hustotu.



$$v_{sp-101} = \frac{m_{sp}}{S_{mezi} \cdot \rho_{sp-101}} \quad (4.2.1.18)$$

$$v_{sp-101} = 10,77 \quad [m/s] \quad - \text{Výstupní rychlost syté páry se srážecí přehřátí}$$

Stejným způsobem si vypočítám i vstupní rychlost a pak rychlost ve zbývajících sekcích, následně si najdu střední rychlost podle  $t_{sp-str}$ , střední teplota dosažená v 51 sekci výměníku.

$$v_{sp-str} = 8,658 \quad [m/s] \quad - \text{Střední rychlost syté páry}$$

$$v_{sp-str} = 0,0000214 \quad [m^2/s] \quad - \text{Střední kinematická viskozita v 51 sekci}$$

Abychom mohli spočítat Reynoldsovo kritérium, musím spočítat ekvivalentní průměr  $d_e$ :

$$d_e = \frac{4 \cdot S_{mezi}}{\pi \cdot Ks_{trb} \cdot d_{trb}} \quad (4.2.1.19)$$

$$d_e = 0,04172 \quad [m] \quad - \text{Ekvivalentní průměr}$$

$$Re_{sp-str} = \frac{v_{sp-str} \cdot d_e}{\nu_{sp-str}} \quad (4.2.1.20)$$

$$Re_{sp-str} = 17345 \quad [-] \quad - \text{Střední Reynoldsovo kritérium pro sytou páru}$$

Výpočet Prandtlova kritéria, podle střední teploty si najdeme tepelnou vodivost a dynamickou viskozitu.

$$\lambda_{sp-str} = 0,03791 \quad [W/m.K] \quad - \text{Střední tepelná vodivost syté páry}$$

$$\eta_{sp-str} = 0,00001782 \quad [kg.m^{-1}.s^{-1}] \quad - \text{Střední dynamická viskozita syté páry}$$

$$c_{p,sp-str} = 2,037 \quad [kJ/kg.K] \quad - \text{Střední měrná kapacita syté páry}$$

Následně můžeme dosadit:

$$Pr_{sp-str} = \frac{\eta_{sp-str} \cdot c_{p, sp-str}}{\lambda_{sp-str}} \quad (4.2.1.21)$$

$$Pr_{sp-str} = 0,9546 \quad [-] \quad - \text{Střední Prandtlovo kritérium pro sytou páru}$$

V normách pro výpočty tepelných výměníků jsem si našel vzorec pro součinitel přestupu tepla při podélném turbulentním proudění.

$$e_t = \left( \frac{T_{Str-sp}}{T_s} \right)^{-0,55} \quad (4.2.1.22)$$

$$e_t = 0,9841 \quad [-] \quad - \text{Součinitel upravující teplotu}$$

$$T_{Str-sp} = t_{str-sp} + 273,15 \quad - \text{Střední teplota sté páry v kelvinech} \quad (4.2.1.23)$$

$$T_s \quad [K] \quad - \text{Odhad teploty stěny v kelvinech}$$

$$\alpha_{sp-str} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{sp-str}}{d_e} \cdot \left( \frac{v_{sp-str} \cdot d_e}{v_{sp-str}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{sp-str}^{0,4} \cdot e_t \cdot e_r \quad (4.2.1.24)$$

$$\alpha_{sp-str} = 58,92 \quad [-] \quad - \text{Střední součinitel přestupu tepla syté páry}$$

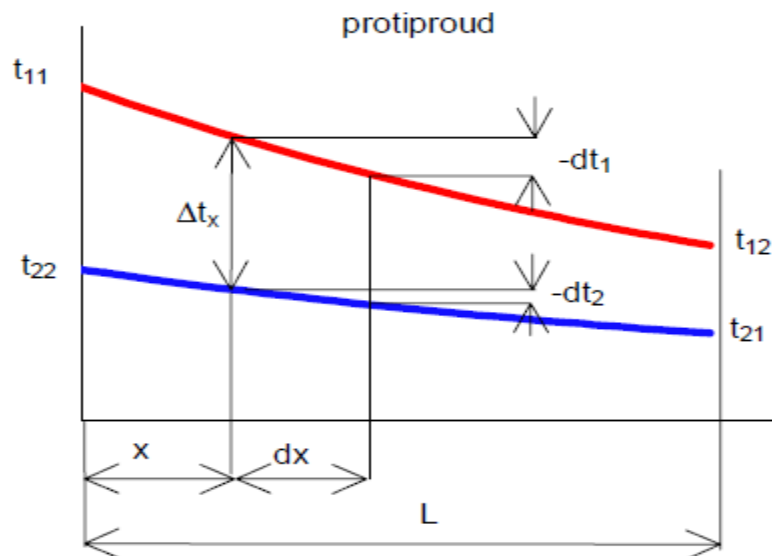
Součinitele přestupu tepla máme spočítané, jak na straně syté páry, tak na straně paroplynové směsi, teprve teď může spočítat součinitel prostupu tepla.

$$\lambda_{ocel-trb} = 45 \quad [W/m.K] \quad - \text{Tepelná vodivost trubek}$$

$$t_{trb} = 1,65 \quad [mm] \quad - \text{Tloušťka trubek}$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{pp-str}} \cdot \frac{d_{trb}}{d_{trb-v}} + \frac{t_{trb}}{\lambda_{ocel-trb}} + \frac{1}{\alpha_{sp-str}}} \quad (4.2.1.25)$$

$$K = 40,97 \quad [W/m^2.K] \quad - \text{Součinitel prostupu tepla}$$



Obr. 4.12 Průběh teploty pro protiproudý výměník [3]

Vypočítáme si délku trubek a odvodíme si ji ze vzorce 4.2.29, výkon výměníku jsem si spočítal v části návrhu bezemisního parního cyklu, nyní si spočítám střední logaritmický rozdíl a ostatní hodnoty spočítané máme.

$$\Delta t_{\text{vet.}} = t_{\text{vp-101}} - t_{\text{sp-1}} \quad (4.2.1.26)$$

$$\Delta t_{\text{menš.}} = t_{\text{vp-1}} - t_{\text{sp-101}} \quad (4.2.1.27)$$

$$\Delta t_{\text{ln}} = \frac{\Delta t_{\text{vet.}} - \Delta t_{\text{menš.}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{vet.}}}{\Delta t_{\text{menš.}}}} \quad (4.2.1.28)$$

$$\Delta t_{\text{ln}} = 31,52 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad - \text{ Střední logaritmický rozdíl}$$

$$Q = (\pi \cdot d_{\text{trb}} \cdot K_{\text{s}_{\text{trb}}} \cdot L) \cdot \Delta t_{\text{ln}} \cdot K \quad (4.2.1.29)$$

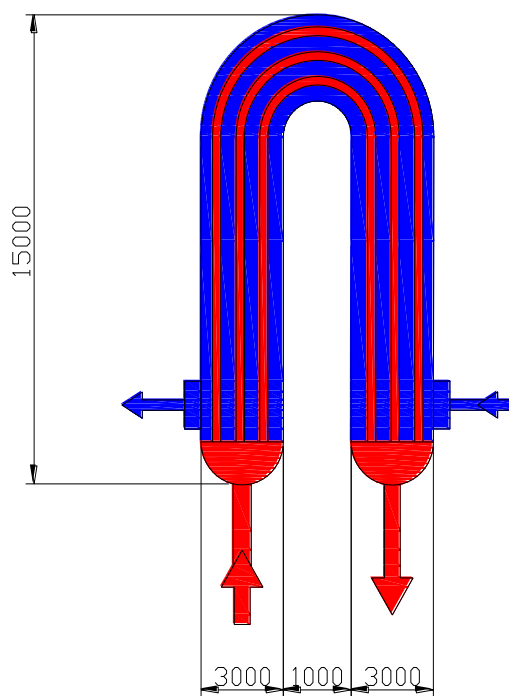
$$Q = 2,071 \quad [\text{MJ/kg}] \quad - \text{ Výkon srážecí přehřátí}$$

$$K = 40,97 \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}] \quad - \text{ Součinitel prostupu tepla}$$

$$d_{\text{trb}} = 0,019 \quad [\text{m}] \quad - \text{ Vnější průměr trubky}$$

$$L = 29,17 \quad [\text{m}] \quad - \text{ Délka trubkovnice}$$

Srážec přehřátí bude mít v rozvinutém taru přibližně 30 metrů což je zařízení, které se nedá převážet. Po zohnutí do tvaru na (obr. 4.13) je celková velikost kolem 15 metrů.



*Obr. 4.13 Výsledné rozměry srážecí přehřátí*

### 4.3 Přeprava srážecí přehřátí

#### Standardní kamion:

šířka 2,4 x výška 2,6 x 13,5 m = rozměry výrobku musí být menší o cca 20 mm

#### Jednoduché speciálky bez doprovodu:

Váha výrobku může být cca 40 tun, šířka 3,2 x výška 2,5 x 14,5 m

#### Speciální přeprava s doprovodem:

Šířka je omezena vraty 7,49 x výška 8,0 nutno výrobek menší cca 20 mm x délka 23 m (šířka mezi vraty 26 m), další omezení troleje TRAM, vlak, aby nemusely být odpojeny musí být celková výška od země menší než 4,7 m (nejnižší podvozek je 40 cm, 60cm do 100 tun), podvozek pro 200 tun má výšku 112 cm, další omezení je hmotnostní, kruhové objezdy a další.

## **Železniční přeprava:**

Dle informací o možnosti přepravy po železnici mi bylo sděleno, že pro daný výrobek je speciální německý vagón s přepravou výrobku o max. hmotnosti 244 tun a poloměrem výrobku 1700 mm o délce 20 m.

## **Závěr:**

Výrobek je příliš velký a těžko přepravitelný a proto jsem se rozhodl přejít na šroubovitě proudění syté páry ve srážeci přehřátí. Při šroubovitém proudění syté páry výměníkem bude docházet k lepšímu přestupu tepla a také k samotnému zmenšení velikosti výměníku, naopak dojde k nárůstu tlakových ztrát.

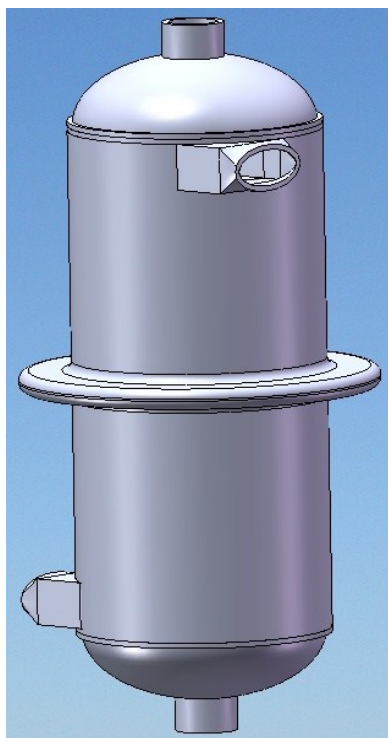
## **5 Návrh srážece přehřátí při příčném šroubovitém obtékání**

Sytá pára nebude podélně obtékat trubky, ale bude proudit příčně na svazek trubek pod úhlem, který tvoří stoupání šroubovice. Paroplynová směs proudí stále podélně v trubkách a tak předešlé vzorce pro přestupu tepla zůstanou stejné, ale změníme geometrii trubek v trubkovnici, jedná se zase o čistý protiproud.

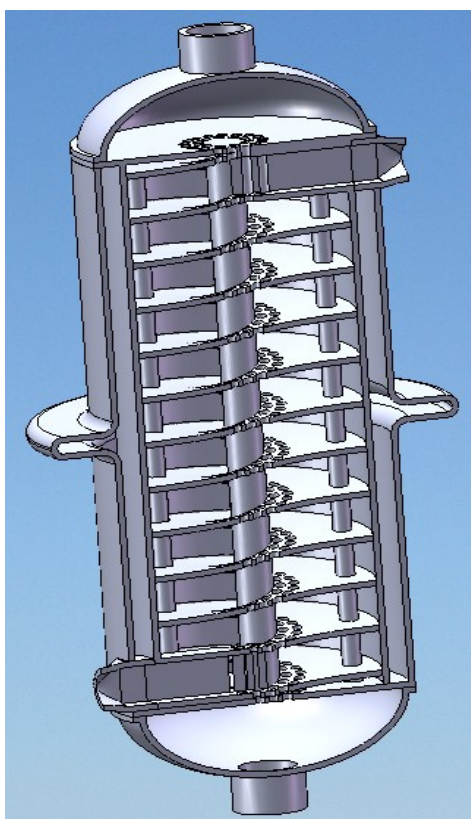
### **5.1 Možné konstrukce srážece přehřátí**

Nakreslil jsem možnou konstrukci výměníku (obr. 5.1). Obrázek se skládá z pláště, trubkovnice, tangenciálních výběhů a víka. Dilatace trubek je řešena na plášti srážece přehřátí, ale jelikož má výměník v průměru 3 metry, tak každá trubka může mít mírně jinou teplotu a v provozu by nevydrželi jednotlivé svary, proto od téhle možnosti musíme opustit a obrázek nám bude sloužit pro vysvětlení principu proudění syté páry.

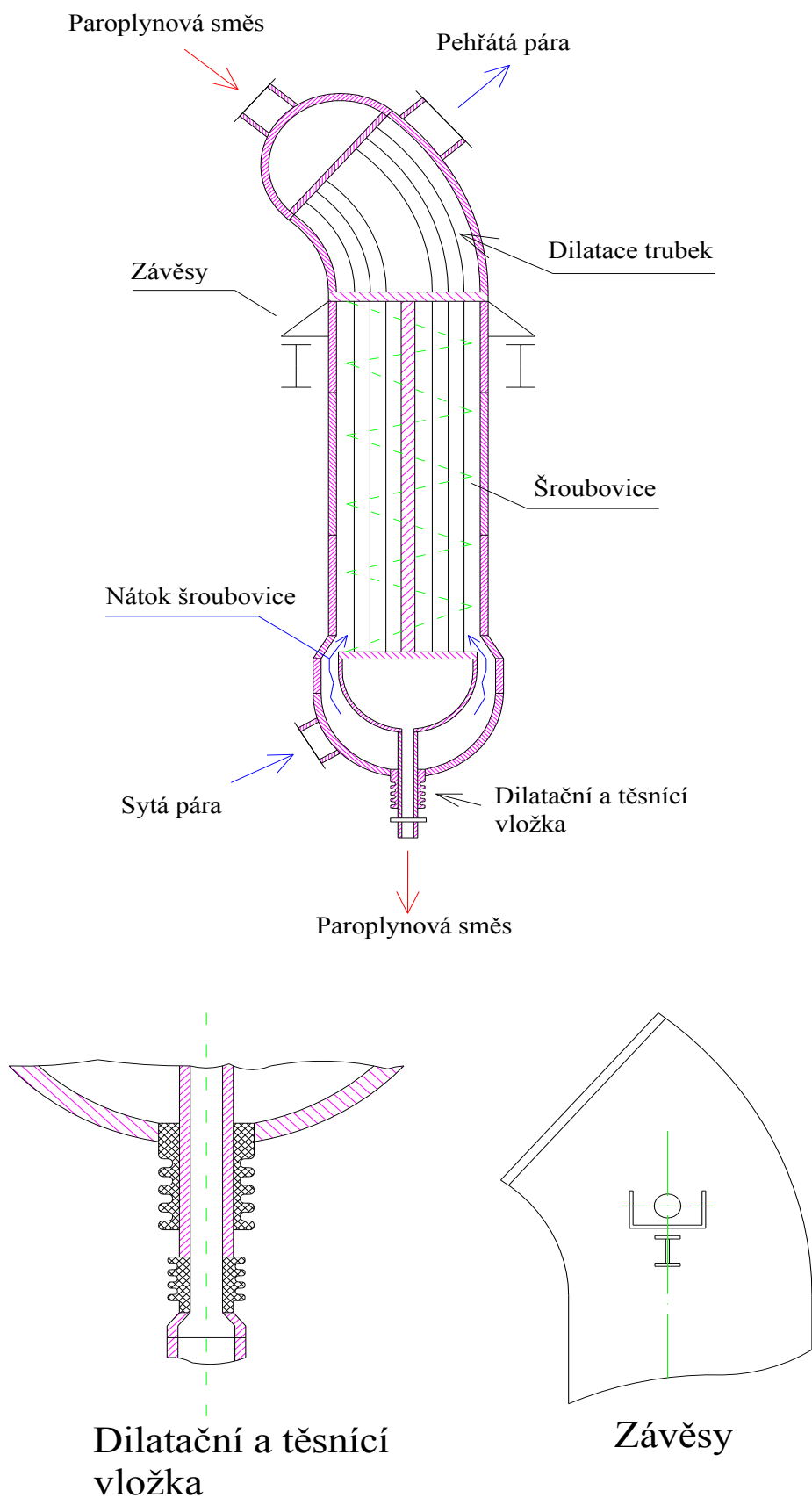
Další možné provedení vidíme na (obr. 5.3), sytá pára vstupuje do výměníků a proudí ve šroubovici a následně podélně kolem trubek. V trubkách nám jako protiproud proudí paroplynová směs, dilatování trubek probíhá v horní části, kde jsou trubky zahnuté. Tato koncepce není taky ideální, protože každá trubka může mít jinou teplotu a bude dilatovat jinak. Vzhledem k velkým dilatacím mezi trubkami a pláště by došlo k popraskání svarového spojení trubek.



*Obr. 5.1 Srážec přehřátí s příčným obtékáním ve šroubovici*



*Obr. 5.2 Srážec přehřátí s příčným obtékáním ve šroubovici v řezu*



Obr. 5.3 Náčrt srážeče přehřátí možné řešení dilatace

Viz příloha B

*Obr. 5.4 Náčrt srážecí přehrátky s kombinací podélného a šikmého proudění ve šroubovici*



### 5.3 Výpočet srážecí přehřátí při podélném a příčném obtékání ve šroubovici [2] [6]

Jako 3 možnost srážecí přehřátí vidíme na (obr. 5.4), sytá pára stoupí do výměníků v dolní části, dále vstupuje do šroubovice (příčné šikmé proudění kolmo na trubky) a při výstupu ze šroubovice proudí podélně kolem trubek. Výměník je čistý protiproud, dilatace trubek je vyřešena v horní části (oblouk trubek) a ve spodní části dilatuje jako na (obr. 5.3) v dilatačním těsnění.

#### 5.3.1 Výpočet množství trubek v trubkovnici

Použiji stejnou metodiku výpočtu jako v předešlé části 4.2.1 a uvedu jenom mnou vypočtené, zvolené hodnoty a geometrii trubek.

$v_{pp-1} = 30,4$  [m.s<sup>-1</sup>] - Zvolená průměrná rychlost paroplynová  
Směs vstupní

$\rho_{pp-1} = 1,456$  [kg/m<sup>3</sup>] - Vstupní hustota paroplynové směsi

$\dot{m}_{pp} = 55,56$  [kg/s] - Hmotnostní průtok paroplynové směsi

Volím stejné trubky vybrané dle EN 10216 – 2 normy pro objednání trubek, z (tab. 4-1) si najdeme průměr potrubí pro naši zvolenou vstupní rychlost a vypočítám si průřez:

$d_{trb} = 0,019$  [m] - Vnější průměr trubek pro trubkovnici

$d_{trb-v} = 0,0157$  [m] - Vnitřní průměr trubek pro trubkovnici

$$S_{trb-v} = \frac{\pi \cdot d_{trb-v}^2}{4} \quad (4.2.1.2)$$

$S_{trb-v} = 0,0001935$  [m<sup>2</sup>] - Vnitřní průřez trubek pro trubkovnici

$$Ks_{trb} = \frac{S_{vs-trb}}{S_{trb-v}} \quad (4.2.1.3)$$

$Ks_{trb} = 6486$  [ks] - Počet trubek v trubkovnici ve srážecí přehřátí

Kruhové pole	D <sub>kp-i</sub> [mm]	D <sub>kp-i</sub> [m]	O <sub>kr-i</sub> [mm]	O <sub>kr-i</sub> [m]	S <sub>kr-i</sub> [mm <sup>2</sup> ]	S <sub>kr-i</sub> [m <sup>2</sup> ]	K <sub>S<sub>trb</sub>-kp-i</sub>	~	L <sub>kr-výseč,i</sub> [mm]	S <sub>trb</sub> [mm]
1	700	0,7	2198	2,198	384650	0,385	73,267	73,000	30,110	30,116
2	780	0,78	2449,2	2,4492	477594	0,478	81,640	81,000	30,237	30,245
3	860	0,86	2700,4	2,7004	580586	0,581	90,013	90,000	30,004	30,014
4	940	0,94	2951,6	2,9516	693626	0,694	98,387	98,000	30,118	30,128
5	1020	1,02	3202,8	3,2028	816714	0,817	106,760	106,000	30,215	30,226
6	1100	1,1	3454	3,454	949850	0,950	115,133	115,000	30,035	30,046
7	1180	1,18	3705,2	3,7052	1E+06	1,093	123,507	123,000	30,124	30,136
8	1260	1,26	3956,4	3,9564	1E+06	1,246	131,880	131,000	30,202	30,214
9	1340	1,34	4207,6	4,2076	1E+06	1,410	140,253	140,000	30,054	30,067
10	1420	1,42	4458,8	4,4588	2E+06	1,583	148,627	148,000	30,127	30,140
11	1500	1,5	4710	4,71	2E+06	1,766	157,000	157,000	30,000	30,013
12	1580	1,58	4961,2	4,9612	2E+06	1,960	165,373	165,000	30,068	30,081
13	1660	1,66	5212,4	5,2124	2E+06	2,163	173,747	173,000	30,129	30,143
14	1740	1,74	5463,6	5,4636	2E+06	2,377	182,120	182,000	30,020	30,034
15	1820	1,82	5714,8	5,7148	3E+06	2,600	190,493	190,000	30,078	30,092
16	1900	1,9	5966	5,966	3E+06	2,834	198,867	198,000	30,131	30,145
17	1980	1,98	6217,2	6,2172	3E+06	3,078	207,240	207,000	30,035	30,049
18	2060	2,06	6468,4	6,4684	3E+06	3,331	215,613	215,000	30,086	30,100
19	2140	2,14	6719,6	6,7196	4E+06	3,595	223,987	223,000	30,133	30,147
20	2220	2,22	6970,8	6,9708	4E+06	3,869	232,360	236,000	29,537	29,551
21	2300	2,3	7222	7,222	4E+06	4,153	240,733	240,000	30,092	30,106
22	2380	2,38	7473,2	7,4732	4E+06	4,447	249,107	249,000	30,013	30,027
23	2460	2,46	7724,4	7,7244	5E+06	4,751	257,480	257,000	30,056	30,071
24	2540	2,54	7975,6	7,9756	5E+06	5,065	265,853	265,000	30,097	30,111
25	2620	2,62	8226,8	8,2268	5E+06	5,389	274,227	274,000	30,025	30,039
26	2700	2,7	8478	8,478	6E+06	5,723	282,600	282,000	30,064	30,078
27	2780	2,78	8729,2	8,7292	6E+06	6,067	290,973	290,000	30,101	30,115
28	2860	2,86	8980,4	8,9804	6E+06	6,421	299,347	299,000	30,035	30,049
29	2940	2,94	9231,6	9,2316	7E+06	6,785	307,720	307,000	30,070	30,085
30	3020	3,02	9482,8	9,4828	7E+06	7,160	316,093	316,000	30,009	30,024
31	3100	3,1	9734	9,734	8E+06	7,544	324,467	324,000	30,043	30,058
32	3180	3,18	9985,2	9,9852	8E+06	7,938	332,840	332,000	30,076	30,091
							6497,707	6486,000		

Tab. 5-1 Rozměry sázení jednotlivých trubek v kruhových polích

V první části, počítám sdílení tepla pro podélné proudění jak na straně syté páry tak i na straně paroplynové směsi, pro výpočet použiji výpočtovou normu pro výměníky tepla v parním kotli. V mém případě se jedná o výměník Biflux (pára-pára). Výměník tepla Biflux se používá pro ohřívání páry sloužící ke vstřiku do přehřáté páry k zajišťování stejné teploty.

### 5.3.2 Výpočet první části srážecí přehrátky

Na (obr. 5.4) je vidět rozdělení výměníku na podélné proudění a proudění ve šroubovici. Nejprve odhadnu teplotu na konci při podélném obtékání, následně aproximovat výpočty do té doby, dokud mi nevyjde potřebná délka podélné části 2 m. Délka je zvolená co nejmenší, protože přestupy tepla při šroubovitým obtékání jsou lepší a sníží se mi celková velikost výměníku. Vypočítané a zvolené hodnoty na konci podélného obtékání jsou pro mě i vstupní parametry při šroubovitým obtékání.

Pro výpočet použiji program EES profesionál, kde si napíšu matematicky potřebné vzorce, výsledkem bude celková délka trubkovnice v první části při podélném proudění. Následně měním výstupní zvolenou teplotu  $t_{pp-2}$  do té doby, než mi vyjde výsledná délka trubkovnice 2 metry. Uvedu jen výsledný výpočet, kdy už jsem aproximoval výstupní teplotu na požadovanou délku 2 metry, ale nejprve jsem si ji zvolil a pak výpočty opakoval.

$t_{pp-1} = 380$  [°C] - Vstupní teplota paroplynové směsi

$t_{pp-2} = 374,26$  [°C] - Zvolená výstupní teplota paroplynové směsi

$t_{sp-2} = 360$  [°C] - Výstupní teplota syté páry

$$t_{pp-str} = \frac{t_{pp-1} - t_{pp-2}}{2} \quad (4.2.1.2)$$

$t_{pp-str} = 377,1$  [°C] - Střední teplota paroplynové směsi

Podle střední teploty si najdu nebo vypočítám termodynamické vlastnosti paroplynové směsi pro sdílení tepla, jedna se o stejný princip jako v předchozí části 2, proto uvedu jen konkrétní hodnoty mnou už vypočítané.

$h_{pp-1} = 2800$  [kJ/kg] - Vstupní entalpie paroplynové směsi

$h_{pp-2} = 2789$  [kJ/kg] - Výstupní entalpie paroplynové směsi

$h_{sp-2} = 2789$  [kJ/kg] - Výstupní entalpie paroplynové směsi

Odhadnul jsem teplotu paroplynové směsi, ale neznám teplotu na straně syté páry, tu si vypočítám z celkového tepelného výkonu v podélné části:

$$Q_{pp} = Q_{sp} = m_{pp} \cdot (h_{pp-1} - h_{pp-2}) \quad (5.3.2.1)$$

$$Q_{pp} = 615,511 \quad [\text{kW}] \quad \text{- Tepelný výkon první části}$$

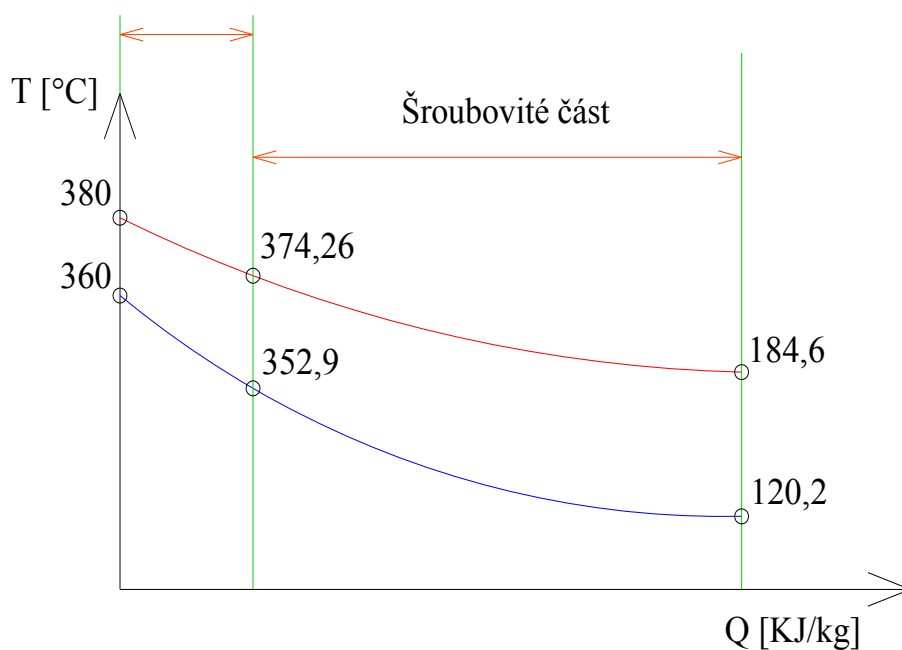
$$Q_{pp} = Q_{sp} = m_{sp} \cdot (h_{sp-1} - h_{sp-2})$$

$$h_{sp-1} = 3194 \quad [\text{kJ/kg}] \quad \text{- Entalpie syté páry na konci podélné části}$$

Z entalpie a tlaku si zjistím teplotu:

$$t_{sp-1} = 352,9 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \text{- Výstupní teplota syté páry}$$

Zbývající vstupní a výstupní parametry jsou stejné, jako v předešlé části. Vypočítal jsem je při návrhu paroplynové cyklu v části 3.1. Nyní můžu nakreslit z vypočítaných hodnot T-Q diagram strážече přehřátí.



Obr. 5.5 T-S diagram srážече přehřátí s podélným a šroubovitým prouděním syté páry

Viz Příloha C

*Obr 5.6 Náčrt geometrie trubek pro podélné proudění*

Reynoldsovo kritérium pro paroplynovou směs:

$$t_{sp-str} = \frac{t_{sp-1} - t_{sp-2}}{2} \quad (4.2.1.2)$$

$$t_{sp-str} = 356,5 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad - \text{ Střední teplota syté páry směsi}$$

$$t_{pp-str} = 377,1 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad - \text{ Střední teplota paroplynové směsi}$$

Podle střední teploty si najdu nebo vypočítám termodynamické vlastnosti paroplynové směsi, to samé i pro sytou páru, jedna se o stejný princip jako v předchozí části 2, proto uvedu jen konkrétní hodnoty mnou už vypočítané.

$$v_{pp-str} = 30,27 \quad [\text{m/s}] \quad - \text{ Střední rychlost paroplynové směsi}$$

$$v_{pp-str} = 0,0000166 \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad - \text{ Střední kinematická viskozita}$$

$$\text{Re}_{pp-str} = \frac{v_{pp-str} \cdot d_{trb-v}}{v_{sm-str}} \quad (4.2.1.7)$$

$$\text{Re}_{pp-str} = 28633 \quad [-] \quad - \text{ Střední Reynoldsovo kritérium}$$

Střední Prandtlovo kritérium pro paroplynovou směs:

Dále si najdu tepelnou vodivost paroplynové směsi a dynamické viskozity při střední teplotě.

$$\lambda_{pp-str} = 0,05176 \quad [W/m.K] \quad - \text{Střední tepelná vodivost}$$

$$\eta_{pp-str} = 0,00002427 \quad [kg.m^{-1}.s^{-1}] \quad - \text{Střední dynamická viskozita}$$

$$c_{p,pp-str} = 1,93 \quad [kJ/kg.K] \quad - \text{Střední měrná tepelná kapacita}$$

Následně můžeme dosadit:

$$Pr_{pp-str} = \frac{\eta_{pp-str} \cdot c_{p,pp-str}}{\lambda_{pp-str}} \quad (4.2.1.10)$$

$$Pr_{pp-str} = 0,9052 \quad [-] \quad - \text{Střední prandtlovo kritérium pro Paroplynovou směs}$$

Odhad střední teploty stěny

$$t_{st-str} = \frac{t_{pp-str} - t_{sp-str}}{2} \quad (5.3.2.2)$$

$$t_{st-str} = 366,8 \quad [^{\circ}C] \quad - \text{Střední teplota stěny}$$

Střední součinitel přestupu tepla

V normách jsem si našel vzorec pro součinitel přestupu tepla při podélném turbulentním proudění pro výměník pára-pára.

$$\eta_{st-pp-str} = 0,00002384 \quad [kg.m^{-1}.s^{-1}] \quad - \text{Střední dynamická viskozita při teplotě stěny paroplynové směsi}$$

$$e_t = \left( \frac{\eta_{pp-str}}{\eta_{st-pp-str}} \right)^n \quad (4.2.1.22)$$

$e_t = 0,1004$  [-] - Korelace teploty když je ( $Pr > 0,7$ )

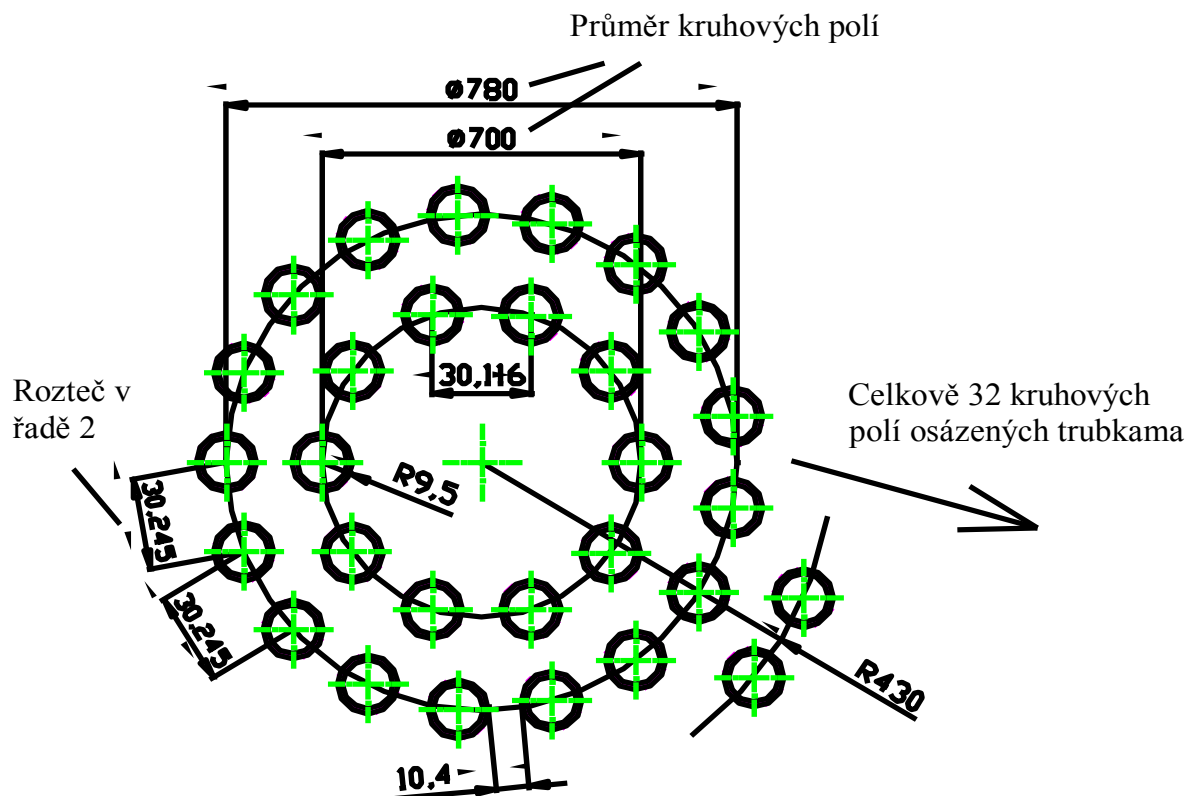
$n = 0,25$  [-] - Při ochlazování kapaliny

Další korelace  $e_l$  a  $e_d$  podle normy vychází 1 a nyní dosadím do vztahu:

$$\alpha_{pp-str} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{pp-str}}{d_{trb}} \cdot \left( \frac{v_{pp-str} \cdot d_{trb}}{v_{pp-str}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{pp-str}^{0,4} \cdot e_t \cdot e_d \cdot e_l \quad (5.3.2.3)$$

$\alpha_{pp-str} = 269,1$  [ $W/m^2 \cdot K$ ] - Střední součinitel přestupu tepla

Výpočet na straně syté páry bude stejný jako v části 4.2, protože jsme změnili geometrii (tab. 5-1) a (obr. 5.7) budou výsledky jiné, ale počítají se podle stejné metody, proto uvedu jen vypočítané hodnoty.



Obr. 5.7 Řazení jednotlivých trubek v jednotlivých kruhových polích

$$S_{\text{mezi.}} = S_{\text{trubkov.}} - S_{\text{trb-v sech}} \quad (4.2.1.17)$$

$$S_{\text{mezi.}} = 6,023 \quad [\text{m}^2] \quad - \text{Meziprostor kde proudí sytá pára}$$

Střední Reynoldsovo kritérium pro sytou páru:

$$\rho_{\text{sp-str}} = 0,6906 \quad [\text{kg/m}^3] \quad - \text{Střední hustota syté páry}$$

$$v_{\text{sp-str}} = 0,00003277 \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad - \text{Střední kinematická viskozita syté páry}$$

$$v_{\text{sp-str}} = \frac{m_{\text{sp}}}{S_{\text{mezi.}} \cdot \rho_{\text{sp-str}}} \quad (4.2.1.18)$$

$$v_{\text{sp-str}} = 9,901 \quad [\text{m/s}] \quad - \text{Střední rychlost syté páry}$$

Vypočítám si znova ekvivalentní průměr, který potřebuji pro výpočet Reynoldsova kritéria

$$d_e = \frac{4 \cdot S_{\text{mezi}}}{\pi \cdot K s_{\text{trb}} \cdot d_{\text{trb}}} \quad (4.2.1.19)$$

$$d_e = 0,06412 \quad [\text{m}] \quad - \text{Ekvivalentní průměr}$$

$$\text{Re}_{\text{sp-str}} = \frac{v_{\text{sp-str}} \cdot d_e}{v_{\text{sp-str}}} \quad (4.2.1.7)$$

$$\text{Re}_{\text{sp-str}} = 19368 \quad [-] \quad - \text{Střední Reynoldsovo kritérium}$$

Výpočet středního Prandtlovo kritérium pro sytou páru

$$\lambda_{\text{sp-str}} = 0,04982 \quad [\text{W/m.K}] \quad - \text{Střední tepelná vodivost}$$

$$\eta_{\text{sp-str}} = 0,00002263 \quad [\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}] \quad - \text{Střední dynamická viskozita}$$

$$c_{p_{\text{sp-str}}} = 2,052 \quad [\text{kJ/kg.K}] \quad - \text{Střední měrná tepelná kapacita}$$



Následně můžu dosadit:

$$\text{Pr}_{\text{sp-str}} = \frac{\eta_{\text{sp-str}} \cdot c_{p, \text{sp-str}}}{\lambda_{\text{sp-str}}} \quad (4.2.1.9)$$

$$\text{Pr}_{\text{sp-str}} = 0,9324 \quad [-] \quad - \text{Střední Prandtlovo kritérium}$$

Použiji stejný vzorec, který jsem našel v normách pro součinitel přestupu tepla při podélném turbulentním proudění pro výměník pára-pára.

$$\eta_{\text{st-sp-str}} = 0,00002306 \text{ [kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}] \quad - \text{Střední dynamická viskozita při}$$

teplotě stěny u syté páry

$$e_t = \left( \frac{\eta_{\text{pp-str}}}{\eta_{\text{st-sp-str}}} \right)^n \quad (4.2.1.22)$$

$$e_t = 0,9979 \quad [-] \quad - \text{Korelace teploty když je } (\text{Pr} > 0,7)$$

$$n = 0,11 \quad [-] \quad - \text{Při ohřívání kapaliny}$$

Další korelace  $e_i$  a  $e_d$  podle normy vychází 1 a nyní dosadím do vztahu:

$$\alpha_{\text{sp-str}} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{\text{sp-str}}}{d_e} \cdot \left( \frac{v_{\text{sp-str}} \cdot d_e}{v_{\text{sp-str}}} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{sp-str}}^{0,4} \cdot e_t \cdot e_d \cdot e_i \quad (5.3.2.4)$$

$$\alpha_{\text{sp-str}} = 46,64 \quad [\text{W/m}^2.\text{K}] \quad - \text{Střední součinitel přestupu tepla}$$

Mám spočítané součinitele přestupu tepla na straně syté páry a na straně paroplynové směsi, tak nyní vypočítám prostup tepla:

$$\lambda_{\text{ocel-trb}} = 45 \quad [\text{W/m.K}] \quad - \text{Tepelná vodivost trubek}$$

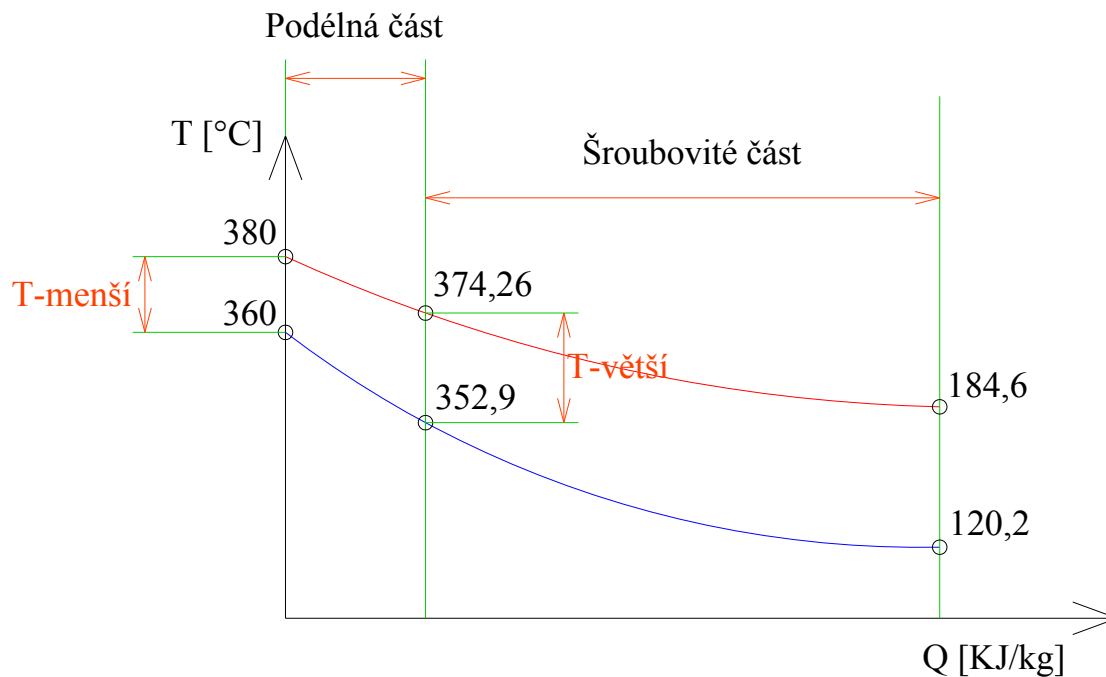
$$t_{\text{trb}} = 1,65 \quad [\text{mm}] \quad - \text{Tloušťka trubek}$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{pp-str}}} \cdot \frac{d_{\text{trb}}}{d_{\text{trb-v}}} + \frac{t_{\text{trb}}}{\lambda_{\text{ocel-trb}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{sp-str}}}} \quad (4.2.1.25)$$

$$K = 38,5 \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$$

- Součinitel prostupu tepla

Nyní si spočítám střední logaritmický rozdíl teploty a výslednou délku trubkovnice



Obr. 5.8 T-S diagram srážecí přehřátí s podélným a šroubovitým prouděním syté páry

$$\Delta t_{\text{vet.}} = t_{\text{pp-2}} - t_{\text{sp-1}} \quad (4.2.1.26)$$

$$\Delta t_{\text{menš.}} = t_{\text{pp-1}} - t_{\text{sp-2}} \quad (4.2.1.27)$$

$$\Delta t_{\text{ln}} = \frac{\Delta t_{\text{vet.}} - \Delta t_{\text{menš.}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{vet.}}}{\Delta t_{\text{menš.}}}} \quad (4.2.1.28)$$

$$\Delta t_{\text{ln}} = 31,52 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- Střední logaritmický rozdíl

Výkon první části jsem si spočítám a se vzorce 4.2.28 si odvodím délku trubkovnice:

$$Q = 615511 \quad [\text{W}]$$

- Tepelný výkon první části

$$Q = (\pi \cdot d_{\text{trb}} \cdot K_{S_{\text{trb}}} \cdot L) \cdot \Delta t_{\text{ln}} \cdot K \quad (4.2.1.29)$$

$L = 2$  [m] - Délka trubkovnice v první části

Protože jsem odhadl teploty stěny, musím provést kontrolu jejich teplot:

$$q_l = K \cdot (t_{\text{str-pp}} - t_{\text{st-sp}}) \quad (5.3.2.5)$$

$q_l = 795,6$  [W/m<sup>2</sup>] - Tepelný tok

Nyní si vypočítám novou teplotu stěny na straně paroplynové směsi

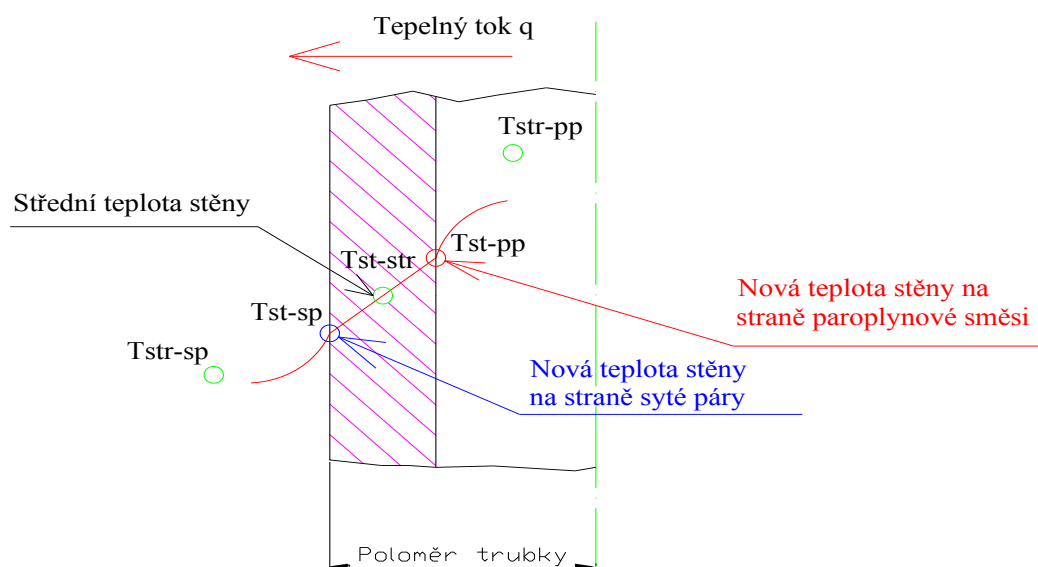
$$q_l = \alpha_{\text{pp-str}} \cdot (t_{\text{str-pp}} - t_{\text{st-pp}}) \Rightarrow t_{\text{st-pp}} = t_{\text{str-pp}} - \frac{q_l}{\alpha_{\text{pp-str}}} \quad (5.3.2.6)$$

$t_{\text{st-pp}} = 374,2$  [°C] - Nová teplota stěny na straně  
Paroplynové směsi

Nyní si vypočítám novou teplotu stěny na straně syté páry

$$q_l = \alpha_{\text{sp-str}} \cdot (t_{\text{st-sp}} - t_{\text{str-sp}}) \Rightarrow t_{\text{st-sp}} = t_{\text{str-sp}} + \frac{q_l}{\alpha_{\text{sp-str}}} \quad (5.3.2.7)$$

$t_{\text{st-sp}} = 373,5$  [°C] - Nová teplota stěny na straně  
Syté páry



Obr 5.9 Znázornění nových vypočítaných teplot stěn

Nové vypočítané hodnoty stěny se liší od odhadnuté střední teploty stěny o několik stupňů, proto musím postup zopakovat od bodu, kdy jsem si vyhledal dynamickou viskozitu při teplotě stěny jak na straně syté páry, tak na straně paroplynové směsi.

Postup výpočtu se opakuje, dokud se nové teploty stěny neliší od těch předchozích více jak o 1°C, pak můžu výpočet ukončit. Proto jsem použil k výpočtu program EES profesionál, kde jsem dosavadní výpočet zkopíroval a vložil ho znova pro nové teploty stěny, protože výpočet se jen opakuje, nebudu ho znova vysvětlovat a uvedu jen výsledné přesné hodnoty.

$$\alpha_{pp-str} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{pp-str}}{d_{trb}} \cdot \left( \frac{v_{pp-str} \cdot d_{trb}}{v_{pp-str}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{pp-str}^{0,4} \cdot e_t \cdot e_d \cdot e_l \quad (5.3.2.3)$$

$$\alpha_{pp-str} = 268,7 \quad [W/m^2 \cdot K] \quad \text{-Nový konečný střední součinitel}$$

přestupu tepla pro paroplynovou směs

$$\alpha_{sp-str} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{sp-str}}{d_e} \cdot \left( \frac{v_{sp-str} \cdot d_e}{v_{sp-str}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{sp-str}^{0,4} \cdot e_t \cdot e_d \cdot e_l \quad (5.3.2.3)$$

$$\alpha_{sp-str} = 46,15 \quad [W/m^2 \cdot K] \quad \text{- Nový konečný střední součinitel}$$

přestupu tepla u syté páry

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{pp-str}} \cdot \frac{d_{trb}}{d_{trb-v}} + \frac{t_{trb}}{\lambda_{ocel-trb}} + \frac{1}{\alpha_{sp-str}}} \quad (4.2.1.25)$$

$$K = 38,15 \quad [W/m^2 \cdot K] \quad \text{- Nový konečný součinitel prostupu tepla}$$

Výsledná konečná délka se změnila jen o 18 mm

$$Q = (\pi \cdot d_{trb} \cdot K s_{trb} \cdot L) \cdot \Delta t_{ln} \cdot K \quad (4.2.1.29)$$

$$L = 2,018 \quad [m] \quad \text{- Nová délka trubkovnice v první části}$$

### 5.3.3 Výpočet druhé části srážecí přehřátí

Důležitá hodnota pro výpočet šroubovitě části je střední rychlost syté páry, ta záleží na rozmístění trubek a na velikosti vstupní komory. Trubky nejsou kladeny za sebou a symetricky, ale jsou vystřídány. Proto rychlost syté páry ve šroubovici není nikde stejná, nakreslím si trubkovnici a v několika řezech si spočítám rychlost syté páry, kterou pak zprůměruji.

Dané hodnoty:

$t_{pp-1} = 374,26$  [°C] - Vstupní teplota paroplynové směsi

$t_{pp-2} = 184,6$  [°C] - Výstupní teplota paroplynové směsi

$t_{sp-2} = 120,2$  [°C] - Vstupní teplota syté páry

$t_{sp-1} = 352,6$  [°C] - Vstupní teplota syté páry

Výpočet středních teplot, které mi určují střední termofyzikální vlastnosti obou medií:

$$t_{pp-str} = \frac{t_{pp-1} - t_{pp-2}}{2} \quad (4.2.1.2)$$

$t_{pp-str} = 279,4$  [°C] - Střední teplota paroplynové směsi

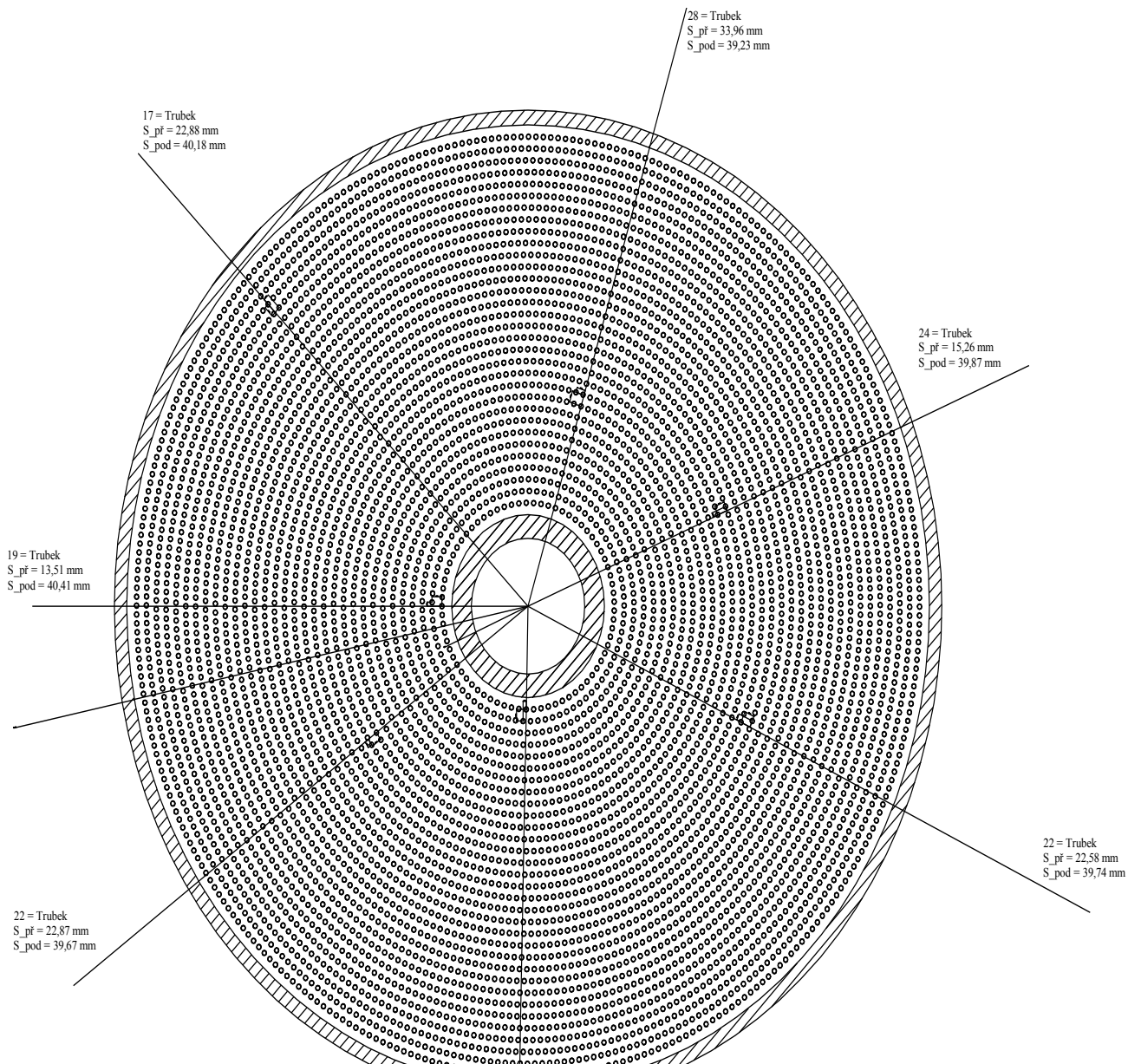
$$t_{sp-str} = \frac{t_{sp-1} - t_{sp-2}}{2} \quad (4.2.1.2)$$

$t_{sp-str} = 236,4$  [°C] - Střední teplota syté páry směsi

Důležitá hodnota pro výpočet střední hodnoty je výška stoupání

$a = 3$  [m] - Zvolené stoupání

Na (obr. 5.10) jsem provedl 7 řezů a v každém řezu spočítal počet trubek, výsledky jsem sečetl zprůměroval, průměrný počet trubek pak použiji pro výpočet meziprostoru kde proudí sytá pára. Pro výpočet přestupu tepla potřebuji znát také průměrnou příčnou a podélnou rozteč kterou si také z obrázku spočítám.

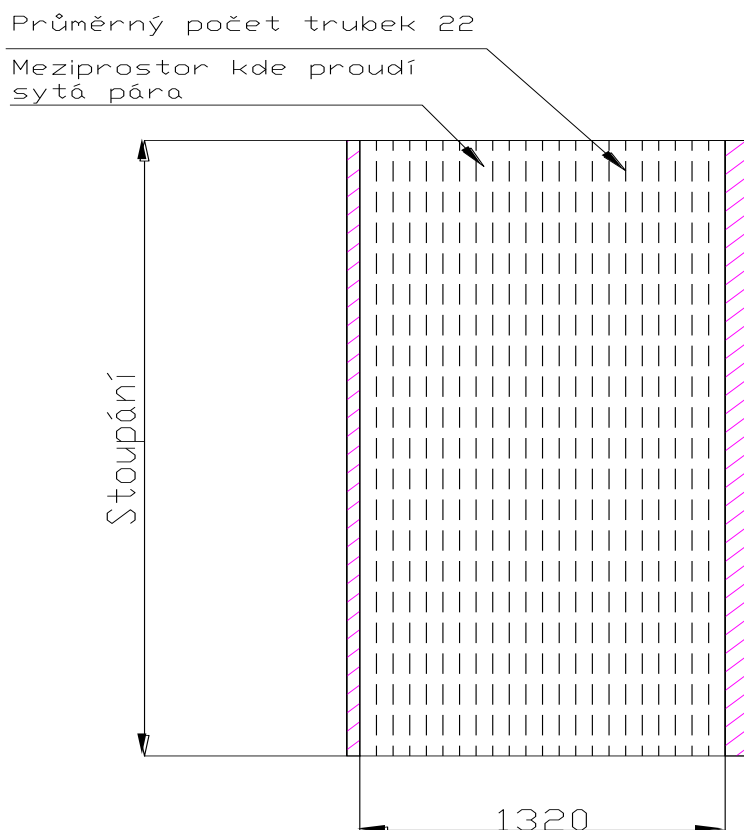


Obr. 5.10 Rozmístění trubek v trubkovnici

$S_{př} = 39,8$  [mm] - Průměrná příčná rozteč

$S_{pod} = 20,56$  [mm] - Průměrná podélná rozteč

Průměrný počet trubek vychází 22 ks, na (obr. 5.11) vidíme průměrný meziprostor kde proudí sytá pára. Pro výpočet rozměrů meziprostoru si musím spočítat průřez všech 22 trubek a průřez obdélníků, který tvoří stoupání a délka mezi pláštěm a střední vodící tyčí.



Obr. 5.11 Náčrt meziprostoru kde proudí sytá pára

$$S_{\text{obdél.iku.}} = 3,96 \quad [\text{m}^2] \quad - \text{Průřez obdélníků}$$

$$S_{\text{trb-22}} = d_{\text{trb}} \cdot a \cdot 22 \quad (5.3.3.1)$$

$$S_{\text{trb-22}} = 1.254 \quad [\text{m}^2] \quad - \text{Průměrný průřez trubek}$$

$$S_{\text{mezi.}} = S_{\text{obdél.iku.}} - S_{\text{trb-22}} \quad (4.2.2.18)$$

$$S_{\text{mezi.}} = 2,706 \quad [\text{m}^2] \quad - \text{Meziprostor kde proudí sytá pára}$$

Nyní můžu přistoupit k výpočtu bezrozměrných kritérií, který potřebuji pro výpočet součinitele přestupu tepla.

Střední Reynoldsovo kritérium pro sytou páru:

$$\rho_{\text{sp-str}} = 0,857 \quad [\text{kg/m}^3] \quad - \text{ Střední hustota syté páry}$$

$$\nu_{\text{sp-str}} = 0,00002058 \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad - \text{ Střední kinematická viskozita syté páry}$$

$$\nu_{\text{sp-str}} = \frac{m_{\text{sp}}}{S_{\text{mezi}} \cdot \rho_{\text{sp-str}}} \quad (4.2.1.19)$$

$$v_{\text{sp-str}} = 18,29 \quad [\text{m/s}] \quad - \text{ Střední rychlost syté páry}$$

Ekvivalentní průměr, který potřebuji pro výpočet Reynoldsova kritéria, se rovná vnějšímu průměru trubky na kterou medium (syta pára) proudí.

$$\text{Re}_{\text{sp-str}} = \frac{v_{\text{sp-str}} \cdot d_{\text{trb-v}}}{\nu_{\text{sp-str}}} \quad (4.2.1.7)$$

$$\text{Re}_{\text{sp-str}} = 16882 \quad [-] \quad - \text{ Střední Reynoldsovo kritérium}$$

Výpočet středního Prandtlovo kritérium pro sytou páru

$$\lambda_{\text{sp-str}} = 0,03709 \quad [\text{W/m.K}] \quad - \text{ Střední tepelná vodivost}$$

$$\eta_{\text{sp-str}} = 0,00001764 \quad [\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}] \quad - \text{ Střední dynamická viskozita}$$

$$c_{p_{\text{sp-str}}} = 2,009 \quad [\text{kJ/kg.K}] \quad - \text{ Střední měrná tepelná kapacita}$$

Následně můžeme dosadit:

$$\text{Pr}_{\text{sp-str}} = \frac{\eta_{\text{sp-str}} \cdot c_{p_{\text{sp-str}}}}{\lambda_{\text{sp-str}}} \quad (4.2.1.21)$$

$$\text{Pr}_{\text{sp-str}} = 0,9554 \quad [-] \quad - \text{ Střední Prandtlovo kritérium pro sytou páru}$$



V normách pro výpočty tepelných výměníků jsem si našel vzorec pro součinitel přestupu tepla při příčné, šikmé, turbulentní proudění.

Použil jsem vzorec s trubkami uspořádanými za sebou, protože vidíme na (obr. 5.10) sytou páru proudit vektorově na trubky kladené za sebou v toku proudu.

$$S_{\text{př}} = 39,8 \quad [\text{mm}] \quad - \text{Průměrná příčná rozteč}$$

$$S_{\text{pod}} = 20,56 \quad [\text{mm}] \quad - \text{Průměrná podélná rozteč}$$

$$\sigma_{\text{př}} = \frac{S_{\text{př}}}{d_{\text{trb}}} \quad (5.3.3.2)$$

$$\sigma_{\text{př}} = 2,0947 \quad [-] \quad - \text{Průměrný příčný rozestup}$$

$$\sigma_{\text{pod}} = \frac{S_{\text{pod}}}{d_{\text{trb}}} \quad (5.3.3.3)$$

$$\sigma_{\text{pod}} = 1,08 \quad [-] \quad - \text{Průměrný podélný rozestup}$$

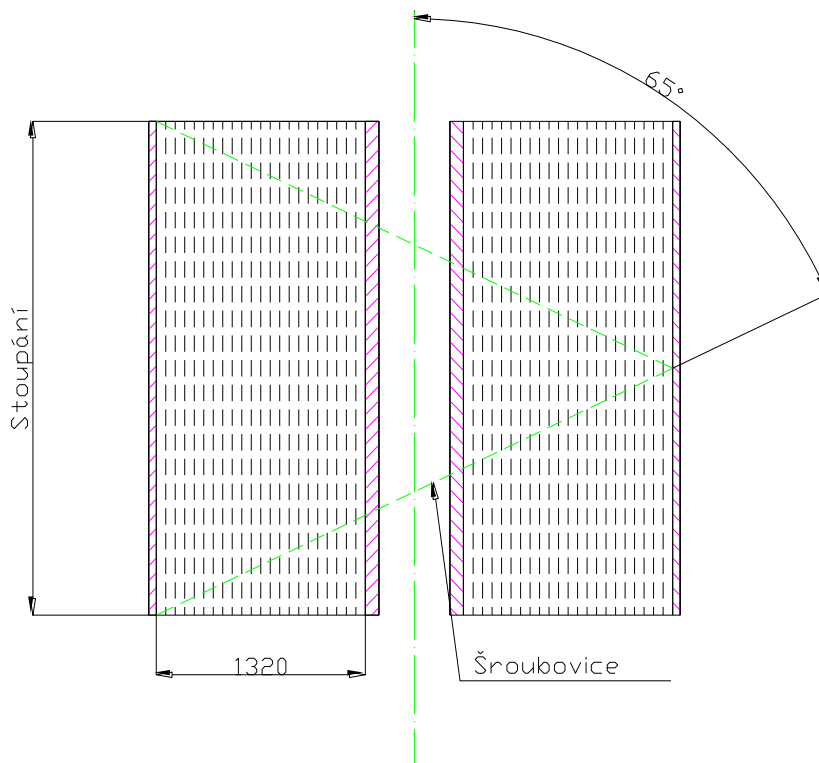
Pro výpočet součinitele přestupu tepla potřebuji znát korelaci pro celkovou geometrii konfigurace svazku trubek.

$$C_s = \left( 1 + (2 \cdot \sigma_{\text{př}} - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_{\text{pod}}}{2} \right)^3 \right)^{-2} \quad (5.3.3.4)$$

$$C_s = 0,8032 \quad [-] \quad - \text{Korelace pro geometrii svazku}$$

$$C_z = 1 \quad [-] \quad - \text{Korelace na počet řad trubek}$$

Jelikož se nejedná čistě o příčné proudění, ale o příčné šikmé proudění, musím do výpočtu započítat korelační součinitel 1,07. Platí jen v případě při úhlu media směrem proudu a osami trubek  $50^\circ > \beta < 80^\circ$



Obr. 5.12 Úhel pro součinitel korelace při šikmém obtékání trubek

Dosadíme do vztahu:

$$\alpha_{sp-str} = 0,2 \cdot C_S \cdot C_Z \cdot \frac{\lambda_{sp-str}}{d_{trb-v}} \cdot \left( \frac{v_{sp-str} \cdot d_{trb-v}}{v_{sp-str}} \right)^{0,65} \cdot Pr_{sp-str}^{0,33} \cdot 1,07 \quad (5.3.3.5)$$

$$\alpha_{sp-str} = 184,9 \quad [W/m^2 \cdot K] \quad \text{-Střední součinitel přestupu tepla}$$

syté páry

Vypočet součinitele přestupu tepla na straně paroplynové směsi se počítá úplně stejně jak v kapitole 5.3.2 výpočet přestupu tepla při podélném obtékání uvnitř trubek. Změní se akorát vstupní a výstupní parametry, ale metodika je stejná, počítám podle normy. Uvedu jen výsledný součinitel přestupu tepla.

$$\alpha_{pp-str} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{pp-str}}{d_{trb}} \cdot \left( \frac{v_{pp-str} \cdot d_{trb}}{v_{pp-str}} \right)^{0,8} \cdot Pr_{pp-str}^{0,4} \cdot e_t \cdot e_d \cdot e_l \quad (5.3.2.3)$$

$$\alpha_{pp-str} = 253,5 \quad [W/m^2 \cdot K] \quad \text{-Střední součinitel přestupu tepla}$$

Mám spočítané součinitele přestupu tepla na straně syté páry a na straně paroplynové směsi, tak nyní vypočítám prostup tepla:

$$\lambda_{\text{ocel-trb}} = 45 \quad [\text{W/m.K}] \quad - \text{Tepelná vodivost trubek}$$

$$t_{\text{trb}} = 1,65 \quad [\text{mm}] \quad - \text{Tloušťka trubek}$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{pp-str}}} \cdot \frac{d_{\text{trb}}}{d_{\text{trb-v}}} + \frac{t_{\text{trb}}}{\lambda_{\text{ocel-trb}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{sp-str}}}} \quad (4.2.1.25)$$

$$K = 97,86 \quad [\text{W/m}^2.\text{K}] \quad - \text{Součinitel prostupu tepla}$$

Nyní si spočítám střední logaritmický rozdíl teploty a výslednou délku trubkovnice

$$\Delta t_{\text{ln}} = \frac{\Delta t_{\text{vet.}} - \Delta t_{\text{menš.}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{vet.}}}{\Delta t_{\text{menš.}}}} \quad (4.2.1.28)$$

$$\Delta t_{\text{ln}} = 39,22 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad - \text{Střední logaritmický rozdíl}$$

Výkon první části jsem si spočítám a se vzorce 4.2.28, celkový výkon výměníku znám z návrhu tepelné bilance, tak si vypočítám tepelný výkon druhé části.

$$Q_{\text{pp}} = Q_{\text{sp}} = m_{\text{sp}} \cdot (h_{\text{sp-1}} - h_{\text{sp-2}})$$

$$Q = 20108000 \quad [\text{W}] \quad - \text{Tepelný výkon první části}$$

$$Q = (\pi \cdot d_{\text{trb}} \cdot K_{\text{s-trb}} \cdot L) \cdot \Delta t_{\text{ln}} \cdot K \quad (4.2.1.29)$$

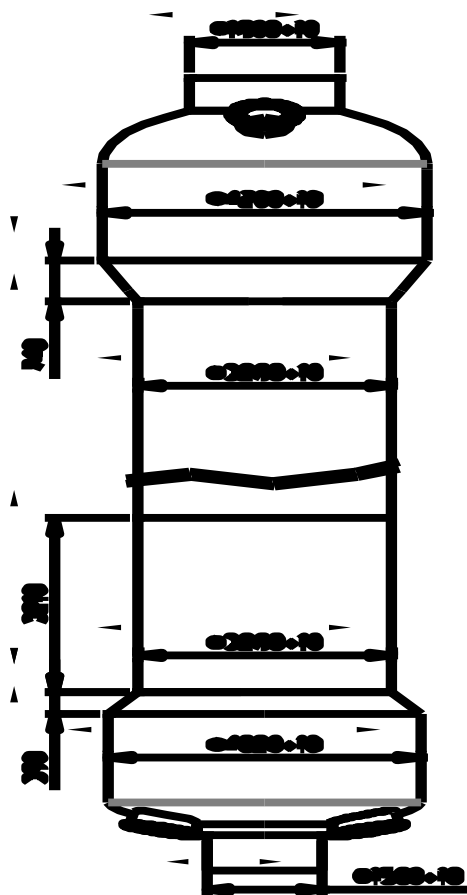
$$L = 13,54 \quad [\text{m}] \quad - \text{Délka trubkovnice v druhé části}$$

Výsledná délka šroubovitě části mi vyšla 13,54 metrů, celková délka vypočítaných teplosměných ploch činí 15,54 metrů. Termodynamické výpočtu můžu opustit a přejít na pevnostní dimenzování srážече přehřátí a jeho součástí.

#### 5.4 Pevnostní dimenzování srážecí přehrátky

Dalším CAD systémem, v TMT využívaným hlavně pro projektování a konstruování ocelových konstrukcí je AutoCAD ver. 2004. IDA NEXIS 32 je používána pro pevnostní kontrolu ocelových konstrukcí. Ve spolupráci s firmou Vitkovice power engineering v útvaru pevnostních výpočtů jsme pomocí IDA NEXIS 32 pevnostně navrhli konstrukci zařízení (obr. 5.13).

Materiál pláště volíme P355GH – Uhlíková ocel legovaná pro využití v tlakově namáhaných prostředích. Je dobře svařitelný a používá se pro výrobu kotelních zařízení. P355GH je ideální materiál pro využití v tlakových nádobách, zejména při tepelném zatížení médiem. Vyrábí se v rámci Euro normy EN10028 standard, který nahradila starší britské a německé normy DIN. Materiál je ekvivalentní k americkému standardu třídy ASTM A516 třídy 70 a ASME SA516 třídy 70. Je to normalizovaná ocel, která je určena pro použití za vyšších teplot. Tento materiál vykazuje dobrou pevnost v tahu a kluzu a má dobré svařovací vlastnosti při použití konvenčních metod svařování. Materiál nabízí také dobré vlastnosti při tváření za studena a tepla.



Obr. 5.13 Náčrt srážecí přehrátky, šířky a velikosti pláště

Viz příloha D

*Obr. 5.14 Návrh trubkovnice pro hluboce klenuté dno*

Vypočítám celkovou roztažnost trubek:

$$\Delta L_{100^{\circ}\text{C}} = 1,1 \quad [\text{mm}] \quad - \text{ Roztažnost materiálů při teplotě } 100^{\circ}\text{C} \text{ o } 1 \text{ metru}$$

$$\Delta L_{\text{str-pp}} = 3 \quad [\text{mm}] \quad - \text{ Roztažnost materiálů při střední teplotě pp o } 1 \text{ metru}$$

Celková délka trubek je součet délky první části a druhé, který tvoří 15,4 m, tuto hodnotu vynásobíme délkovou roztažností při střední teplotě paroplynové směsi  $\Delta L_{\text{str-pp}} = 3$

$$\Delta L_{\text{celkové\_tr}} = \Delta L_{\text{str-pp}} \cdot 15,4 \quad (5.4.1)$$

$$\Delta L_{\text{celkové\_tr}} = 46,2 \quad [\text{mm}] \quad - \text{ Průměrné protažení trubek v celé jejich délce}$$

Z vypočítané délky roztažení trubek navrhnu dilataci tak, aby pokryla prodloužení trubek v rozmezí 50- 0 mm.

Vypočítám průměrnou roztažnost pláště, výpočet se bude skládat podle předchozí filozofie, materiál se prodlužuje přibližně o 1,1 mm na jednom metru materiálu zahřátého na 100°C, celková délka je rovna velikosti celého srážече přehřátí 20 metrů.

$$\Delta L_{\text{str-pp}} = 2,6 \quad [\text{mm}] \quad - \text{ Roztažnost materiálů při střední teplotě sp o 1 metru}$$

$$\Delta L_{\text{celkové\_tr}} = \Delta L_{\text{str-pp}} \cdot 20 \quad (5.4.2)$$

$$\Delta L_{\text{celkové\_tr}} = 52 \quad [\text{mm}] \quad - \text{ Průměrné protažení trubek v celé jejich délce}$$

Z vypočtené hodnoty vyplývá, že srážec přehřátí se při plném provozu prodlouží o půl metru.

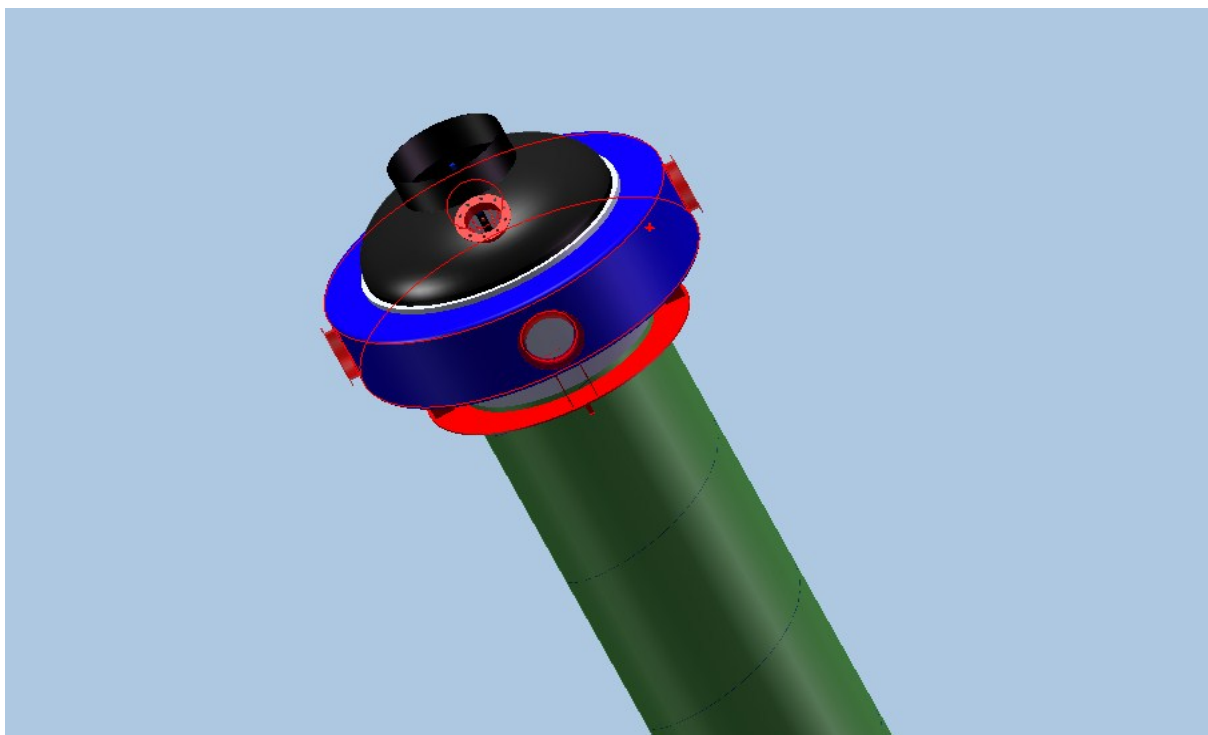
Další část diplomové práce je nakreslení výkresu srážече přehřátí jako sestavy na formátový výkres A1, dále nakreslím výkres trubkovnice a oba výkresy budete mít možnost nalézt v příloze.

## 5.5 Výsledný návrh srážече přehřátí

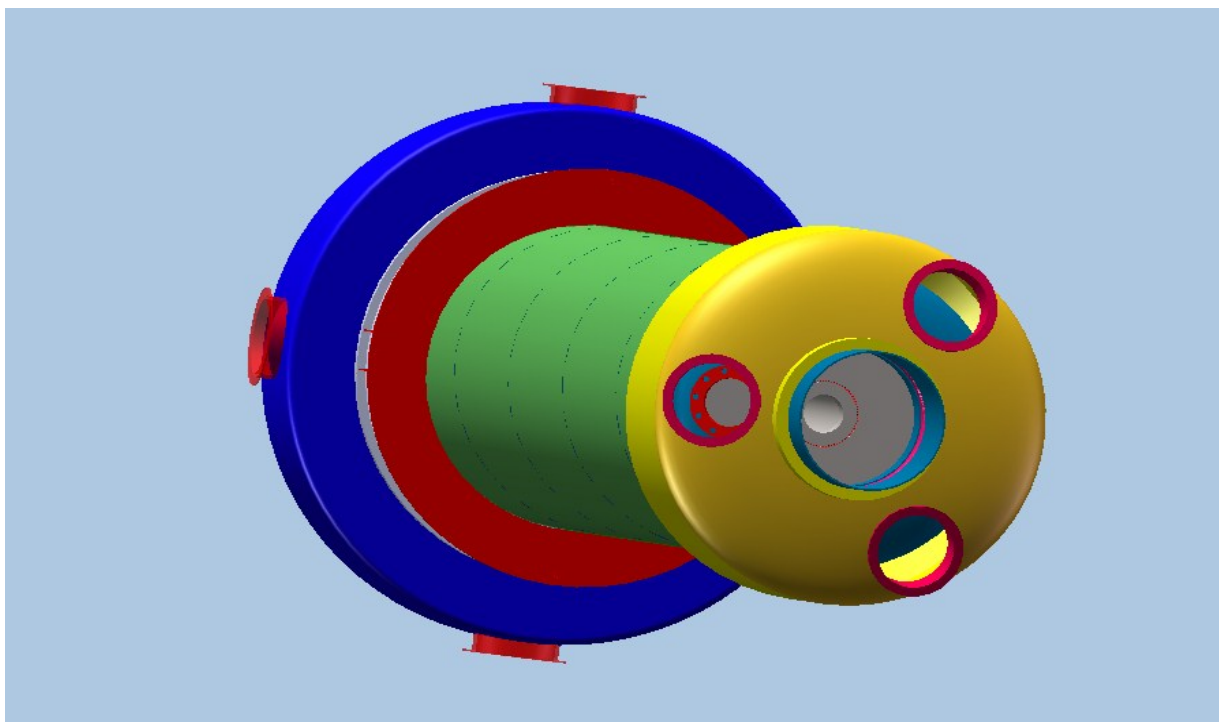
Pro zvýšení úrovně diplomové práce, jsem nakreslil srážec přehřátí jako 3D model v programu SolidWorks 2010, srážec přehřátí je nakreslen ve skutečných velikostech podle vypočítaných hodnot, celý model je totožný s výkresy sestavy. Srážec přehřátí obsahuje přibližně 6400 trubek, takové velké množství trubek značně zpomaluje výkon programu a je potřeba spousta času pro vykreslení veškerých trubek. V rámci mých možností jsem nakreslil jen první a polední kruhové pole kladení trubek.



*Obr. 5.15 Navržení srážec přehřátí*



*Obr. 5.16 Navržení srážec přehřátí vrchní část*



*Obr. 5.17 Navržení srážec přehřátí spodní část*

Viz příloha E

*Obr. 5.18 Navržení srážec přehřátí v řezu*



Viz příloha F

*Obr. 5.19 Navržení srážecí přehrátky v řezu vrchní část*

Viz příloha G

*Obr. 5.20 Návrh srážecí přehrátky v řezu spodní část*

## 6 Závěr

V první části diplomové práce jsem se seznámil s bezemisním parním cyklem CES cleans energii systém a popsal jeho hlavní výhody a nevýhody. Udělal jsem rozbor jednotlivých zařízení včetně separačního parogenerátoru sloužící k oddělení oxidu uhličitého a vodní páry. Jedním z mých nejdůležitějších úkolů v první části diplomové práce, bylo shromáždění potřebné literatury, vzorců, umožňující matematicky a fyzikálně popsat paroplynovou směs. Následně jsem navrhl a nakreslil vlastní paroplynový cyklus pomocí peach point metody dle zadání diplomové práce. V tomto navrženém cyklu navrhuji výměník tepla nazývaný jako srážec přehřátí, který jsem si rozložil na 101 částí a zkoumal termodynamické vlastnosti paroplynové směsi a syté páry jak se mění s různou teplotou. Výsledné hodnoty zachycuji v grafech vytvořených v programu EES profesionál, ve kterém jsem prováděl veškeré výpočty včetně navržení paroplynového cyklu. Srážec přehřátí počítám jako protiproud, kdy paroplynová směs proudí v trubkách a sytá pára podél trubek. Výsledná délka srážec přehřátí ve tvaru U vychází 15 metrů o výšce 7 metrů. Tyto rozměry jsou podle informací přepravních služeb nepřepavitelné, proto jsem takovou variantu srážec přehřátí zavrhnul.

V další části diplomové práce, řeším konstrukční varianty srážec přehřátí tak, abych splnil požadavky na přepravitelnost, a aby veškeré součásti mohli bez problému dilatovat. Navrhl a vypočítal jsem tři varianty srážec přehřátí, zvolil poslední možnost, která splňuje nejlépe veškeré požadavky. Jedná se o variantu, kdy je výpočet sdílení tepla rozdělen na 2 části. V první části proudí sytá pára podél trubek, ve kterých jako protiproud proudí paroplynová směs. Ve druhé části proudí sytá pára ve šroubovici, dosahuje dobrého přestupu tepla a tím ke zmenšení celkové délky. Výsledná délka obou částí tvoří 15,4 metrů, pevnostní dimenzování srážec přehřátí jsem provedl ve spolupráci s firmou Vitkovice power engineering, s kterou jsem po celou dobu řešení diplomové práce spolupracoval. Podle vypočítaných hodnot jsem nakreslil 2 výkresy, první výkres sestavy srážec přehřátí, ve druhém technologický výkres trubkovnice. Celý srážec přehřátí jsem nakreslil jako 3D model v programu SolidWorks podle vypočítaných hodnot se skutečnými rozměry. Navržený srážec přehřátí je unikátní zařízení, díky svým rozměrům, možnosti ochlazování paroplynové směsi a ohřívání syté páry na přehřátou díky proudění ve šroubovici.

Pro počítaný systém CES byl navržen jeden srážec přehřátí. Podle předběžného šetření by měl být přepravitelný do Komárna a pak lodní doprava.

Přes Německo by to mohl být problém, přesun po Labi. Doprava se zjednoduší, pokud se pro počítaný systém CES navrhne dva paralelní srážecí přehrátky.

## 7 Seznam Použité literatury

- [1] Kohoutek J, Jegla Z, Kilkovský B, J. *Studie Teoretických vlastností paroplynové směsi - výzkum a vývoj separačního parogenerátoru*, VUT Brno, říjen 2007.
- [2] ON 07 0417 *Návrh : Tepelné výpočty parních kotlů – návrh oborové normy*, Vydavatelství úřadů pro normalizaci a měření Praha, 1984.
- [3] Vít, T.: *Základy přenosu tepla a hmoty – Přenos hybnosti a tepla*, Publikace, 2004.  
Dostupné z WWW: < <http://www.kez.tul.cz/web/hlavni/data/doplňky/PTHI.pdf> >
- [4] Milčák, P. *Termodynamické a transportní vlastnosti parovzduchové směsi*, Studijní opora VÍTKOVICE POWER ENGINEERING a.s.
- [5] Kadrnožka, J. *Transportní vlastnosti vlhkého vzduchu - odborná studie*, Brno: VUT Brno, 2007. 12 s.
- [6] Dlouhý, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*, Skriptum ČVUT Praha, 2002, ISBN 80-01-02591-8

## **8 Přílohy**

[A] Schéma navrženého bezemisního parního cyklu pomocí peatch metody

[B] Náčrt srážecí přehrátky

[C] Náčrt geometrie trubek pro podélné proudění

[D] Návrh trubkovnice pro hluboce klenuté dno

[E] Navržená srážecí přehrátky v řezu

[F] Navržená srážecí přehrátky v řezu vrchní část

[G] Návrh srážecí přehrátky v řezu spodní část

[H] Výpočtový výkres sestavy srážecí přehrátky v AutoCAD

[CH] Výpočtový výkres rozmístění trubek v AutoCAD

[I] Výpočtový 3D model srážecí přehrátky v SolidWorks